

5章 下部構造における塩害対策の検討

3章でも記述したように第2回塩害調査（2000年実施）で得られた下部構造のデータの数が少ないという理由などから、下部構造の塩害対策を適切に評価・検討するにあたり2001年に別途、下部構造の塩害調査（以下、2001年下部構造塩害調査）を実施した。この章では、2001年下部構造塩害調査結果の報告をするとともに、S59 塩対指針（案）に示された下部構造の塩害対策についての再評価を行い、新たに下部構造における塩害対策の提案を行った。

5.1 データの整理

5.1.1 対象データ

各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局が管理する橋梁の橋梁諸元データ、橋梁定期点検（近接）結果のデータ及び※第2回塩害調査（2000年実施）データを使用した（※第2回塩害調査（2000年実施）の下部工の調査結果については、参考データという位置づけで「5.1.3 損傷事例の整理」「5.2 拡散理論による必要かぶりの算出」でのみ扱うこととする。）。

橋梁諸元データと橋梁定期点検（近接）結果データは、国土交通省道路管理データベースシステム（MICHI）と（財）道路保全センターがMICHIのデータファイルを利用して開発した橋梁保全支援システムをデータソースとしている。

5.1.2 基礎的調査事項の整理

(1) 損傷度の定義の説明

直轄国道の橋梁の定期点検（近接）は、「土木研究所資料第2651号 橋梁点検要領（案）：建設省土木研究所、昭和63年7月」に基づいて実施されている。

損傷度の判定は、各部材ごとに、損傷の種類や状態、部材の重要度、損傷の進行状況を総合的に判断して行うことになっており、損傷の程度による点検結果の判定は損傷度判定標準により区分されている。

具体的な判定は、「損傷度判定基準（案）」に基づいて行われるのが一般的である。この判定の基本的な考え方は次の6つである。

① 損傷の種類別に橋の耐荷力・耐久性に与える影響の程度を次の3つの要因に分類して整理し、判定する。

- ・ 損傷の位置あるいはパターン（X）
- ・ 損傷の深さ（Y）
- ・ 損傷の拡がり（Z）

② 損傷の種類別判定においては、主部材は2次部材より原則として上位の判定区分とする。

③ 損傷が進行している場合は、部材の損傷度判定区分に進行していることを示し、注意を促す。

④ 損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある場合は、耐荷力・耐久性の影響を問わず判

定区分Ⅰとする。

- ⑤ 判定区分Ⅰは、点検の結果からは機械的に判定せず、道路管理者ならびに点検者が周囲の状況を総合的に判断して判定する。
- ⑥ 部材別の損傷度の判定で、1部材に複数の種類の損傷がある場合には、損傷の種類ごとの判定結果のうち、最上位の判定区分となる損傷の種類をその部材の判定結果とする。

損傷度の判定はできるだけ点検者が客観的かつ容易に損傷度を評価できるように、橋梁の耐荷力に関連があると考えられる損傷の位置あるいはパターン、損傷の深さ、損傷の拡がりの3つの要因に対してそれぞれ各損傷がどの程度であるかを大、中、小で判定すれば機械的に損傷ランク（Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、O.K）が決定されるシステムとなっている。

ただし、損傷の位置あるいはパターン、損傷の深さ、損傷の拡がりは、損傷項目すべてに対して一律に3つとも考慮されるものではない。

損傷ランクの決定に際して考慮される部材の重要性（主部材と2次部材との区別）については、橋の耐荷力・耐久性に着目して以下のように決められている。

- ・主部材

主桁、横桁、縦桁、対傾構、横構、床版、橋脚、橋台、基礎、支承、落橋防止装置

- ・2次部材

高欄、防護柵、地覆、中央分離帯、縁石、舗装、伸縮装置、排水施設、点検施設、遮音施設、照明施設、標識、袖擁壁、添架物

(2) データ取得状況

統計処理に用いる橋梁諸元等データと橋梁定期点検（近接）結果データは、国土交通省道路管理データベースシステム（以下、MICH I と表す）と、（財）道路保全技術センターが MICH I のデータファイルを利用して開発した橋梁保全支援システムをデータソースとしている。

各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局が管理する橋梁のデータ取得状況を付7表-2.3.1 に整理する。

表-5.2.1 データ取得状況（平成13年5月末現在）

		MICH I_D010 橋梁基本 レコード数	橋保_KT0B 点検調書共通橋梁 定期点検（近接） レコード数	橋保_KT0B 点検調書共通橋梁 点検調査年	備考
北海道開発局		3,135	2,230	S63年度～H7年度	点検調査年月日 レギュラーレコード数 2
地方 整備 局	東北地方整備局	1,915	438	H1年度～H11年度	
	関東地方整備局	1,999	867	S63年度～H11年度	点検調査年月日 レギュラーレコード数 34
	北陸地方整備局	1,434	1,025	S63年度～H11年度	点検調査年月日 レギュラーレコード数 3
	中部地方整備局	2,501	1,520	S58年度～H11年度	
	近畿地方整備局	2,373	478	S57年度～H11年度	点検調査年月日 レギュラーレコード数 1
	中国地方整備局	2,135	749	S51年度～H11年度	
	四国地方整備局	1,401	325	S59年度～H11年度	点検調査年月日 レギュラーレコード数 17
	九州地方整備局	2,016	861	S62年度～H11年度	点検調査年月日 レギュラーレコード数 2
沖縄総合事務局		156	26	H8年度， H10年度	H9年度定期点検 （近接）データなし
合計		19,065	8,519		点検調査年月日 レギュラーレコード数 59

※ MICH I_D010 橋梁基本：MICH I のデータテーブルの名称

橋保_KT0B 点検調書共通橋梁：橋梁保全支援システムのデータテーブルの名称

(3) 基本データの整理

統計処理に用いるデータの性質、特性等を把握するため、統計処理単位（橋梁数、橋台・橋脚数）と統計処理パラメータ（供用年数、塩害地域区分、海岸線からの距離、凍結防止剤散布回数）による基本データの集計を行った。

これらの集計結果を図-5.2.1～5.2.18に示す。

なお、ここでは、塩害地域区分について、S59 塩対指針（案）の区分に属する地域・県の全範囲を対象（塩害地域区分Aはいずれも沖縄県全県が対象）とするものと、全範囲を対象とせずS59 塩対指針（案）で規定している地域区分によるものを使い分けている。塩害地域区分による集計結果としては図-5.2.5

～5.2.18があるが、前者の塩害地域区分によるものは図-5.2.7～5.2.12、後者の塩害地域区分によるものは図-5.2.5、5.2.6、5.2.13～5.2.18となっている。

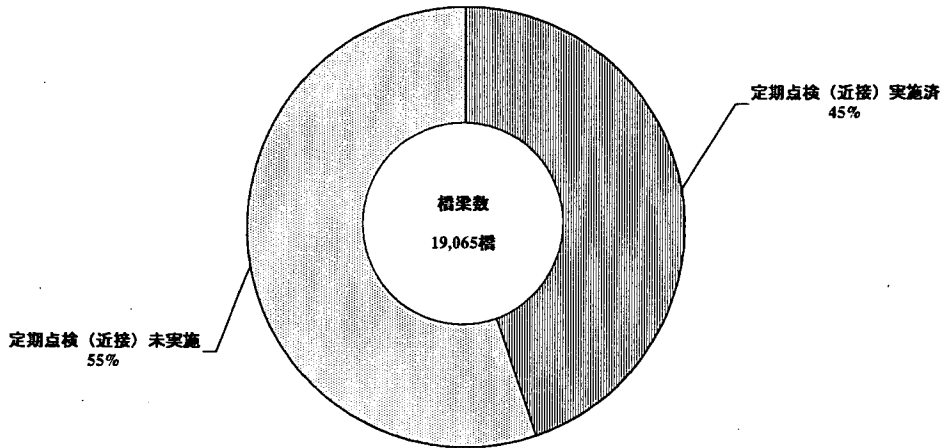


図-5.2.1 橋梁数

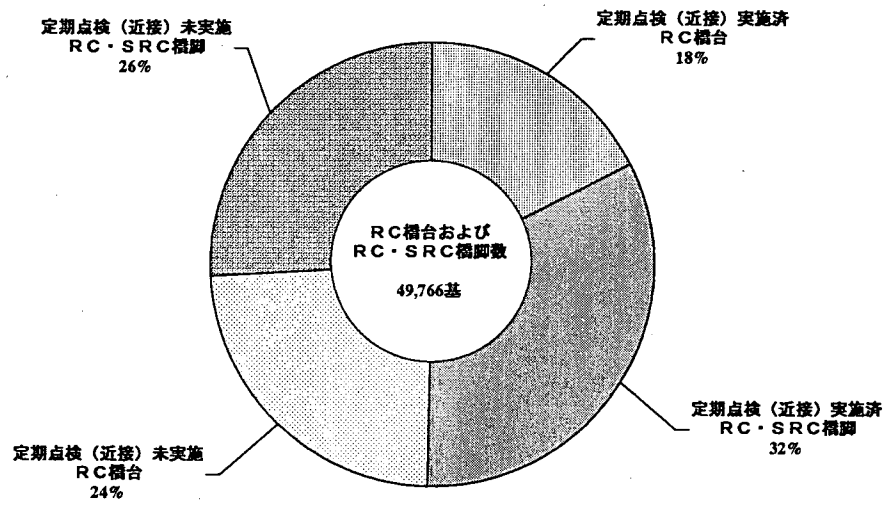


図-5.2.2 RC橋台およびRC・SRC橋脚数

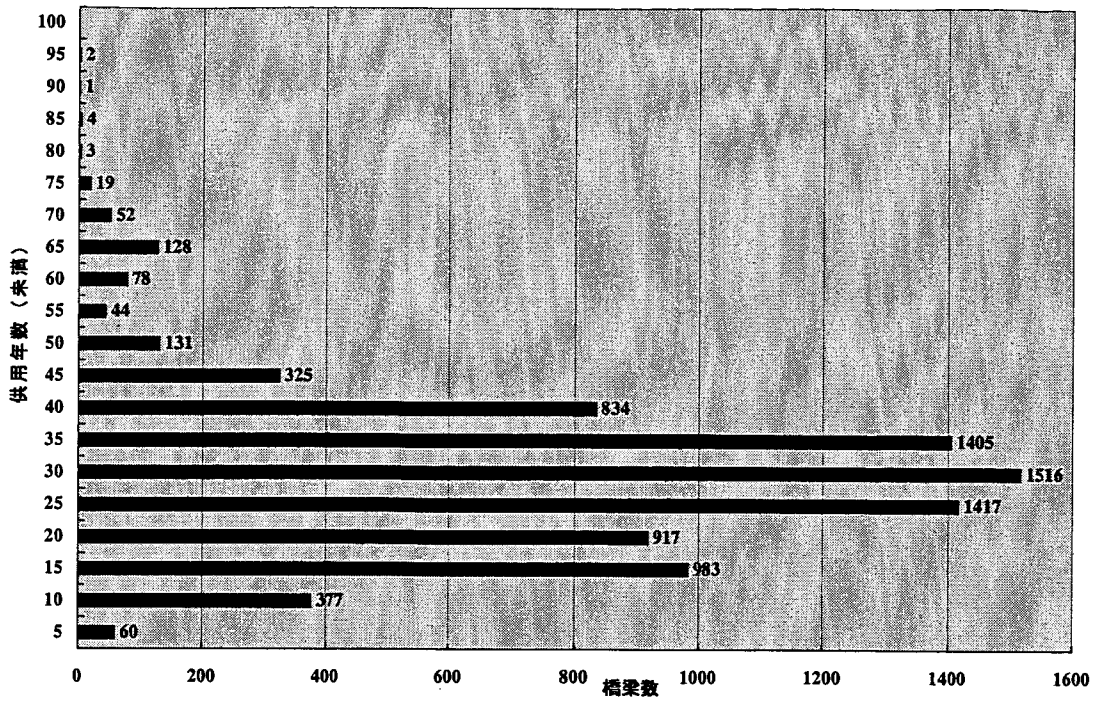


図-5.2.3 供用年数別橋梁数 (定期点検 (近接) 実施済)

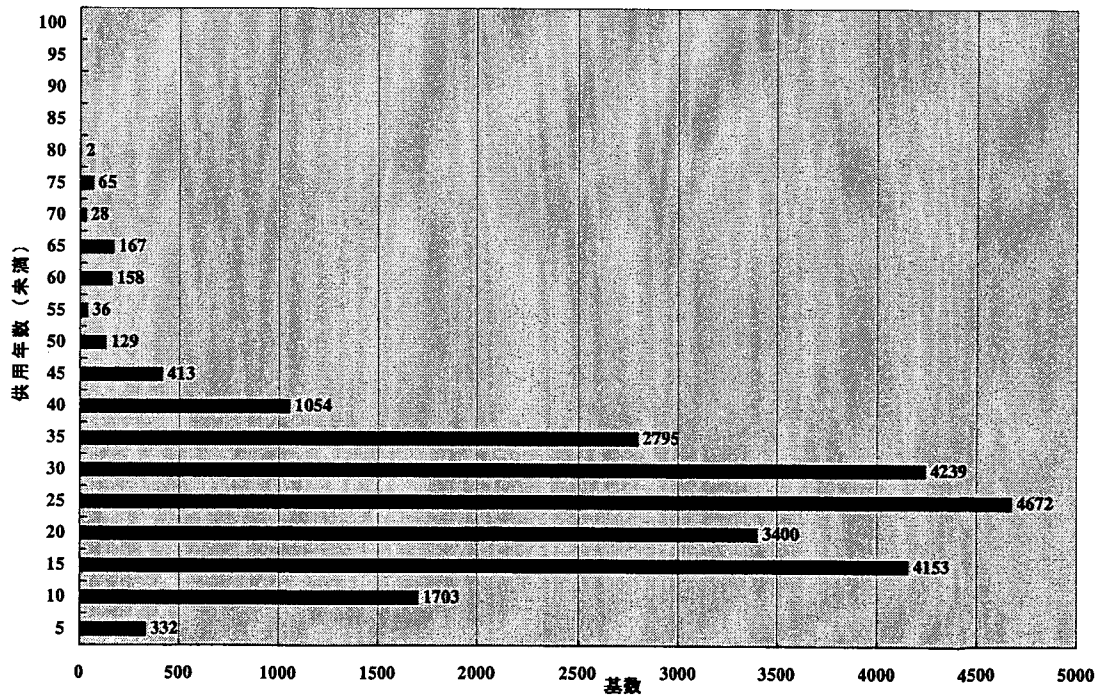


図-5.2.4 供用年数別RC橋台およびRC・SRC橋脚数 (定期点検 (近接) 実施済)

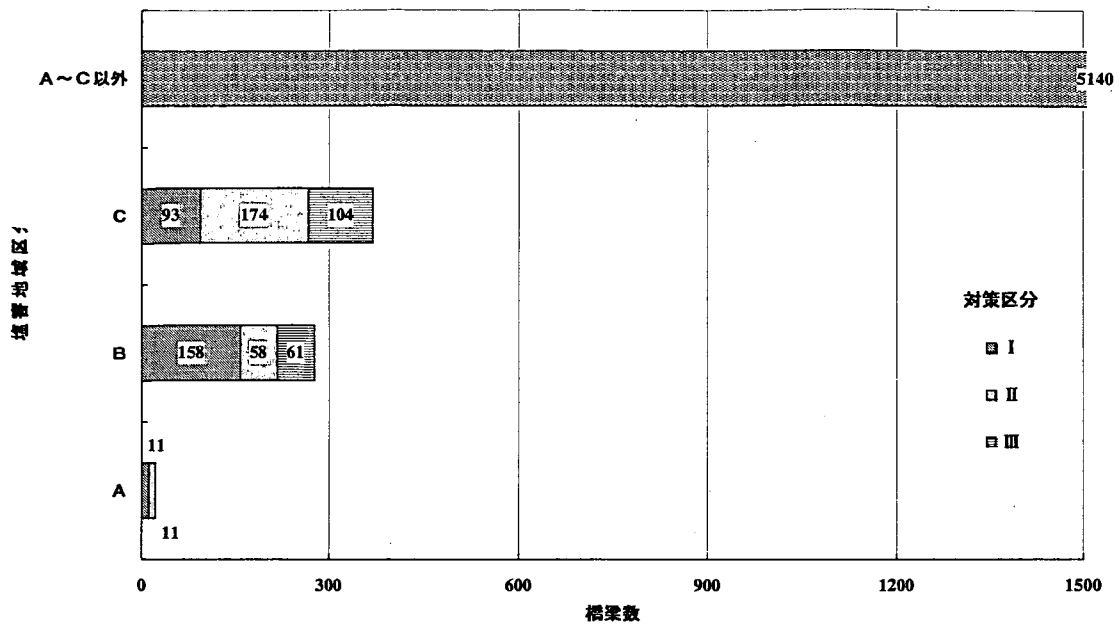


図-5.2.5 塩害地域区分別橋梁数 (定期点検 (近接) 実施済)

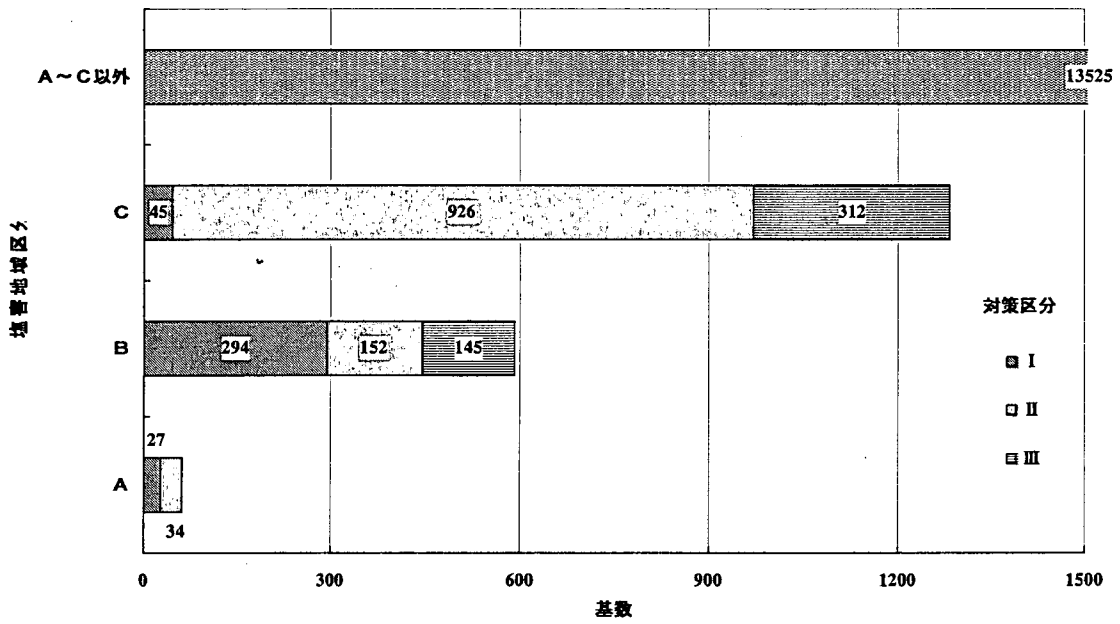


図-5.2.6 塩害地域区分別RC橋台およびRC・SRC橋脚数 (定期点検 (近接) 実施済)

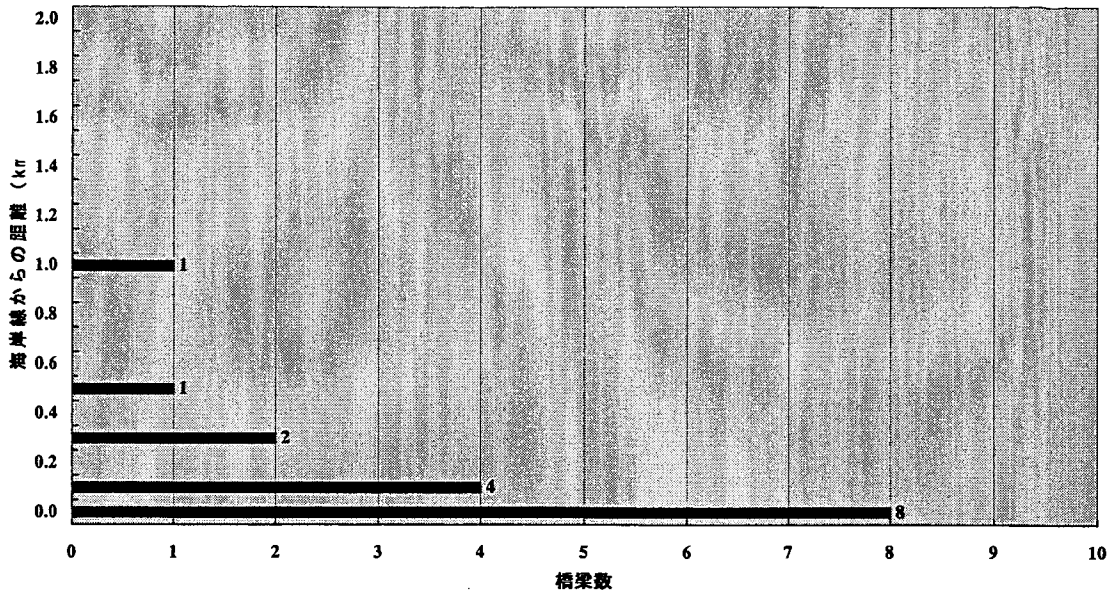


図-5.2.7 海岸線からの距離別橋梁数（塩害地域区分A）
（定期点検（近接）実施済）

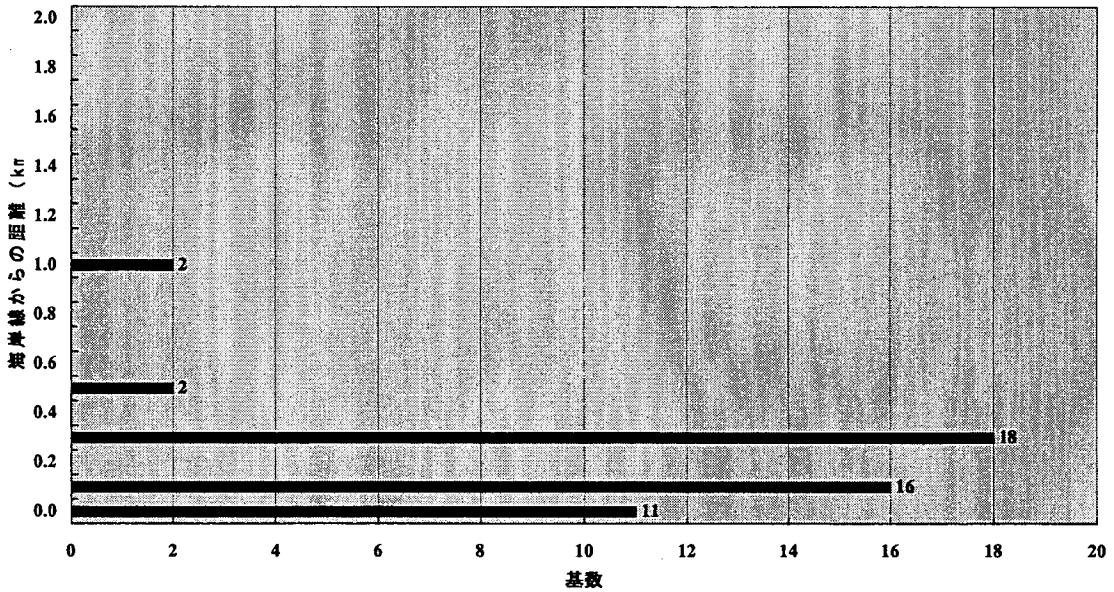


図-5.2.8 海岸線からの距離別RC橋台およびRC・SRC橋脚数（塩害地域区分A）
（定期点検（近接）実施済）

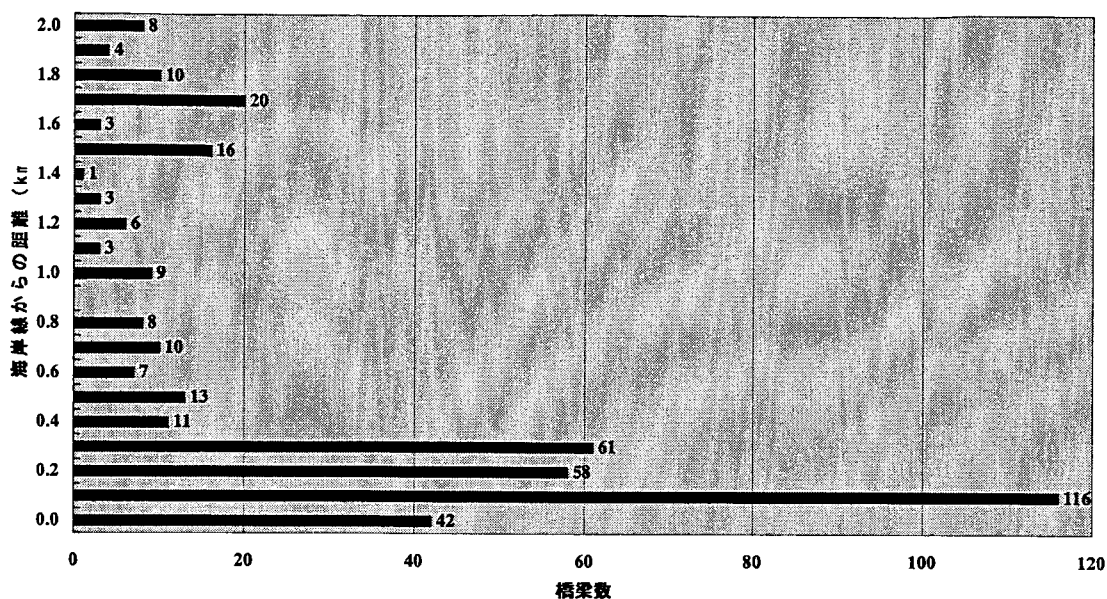


図-5.2.9 海岸線からの距離別橋梁数（塩害地域区分B）
（定期点検（近接）実施済）

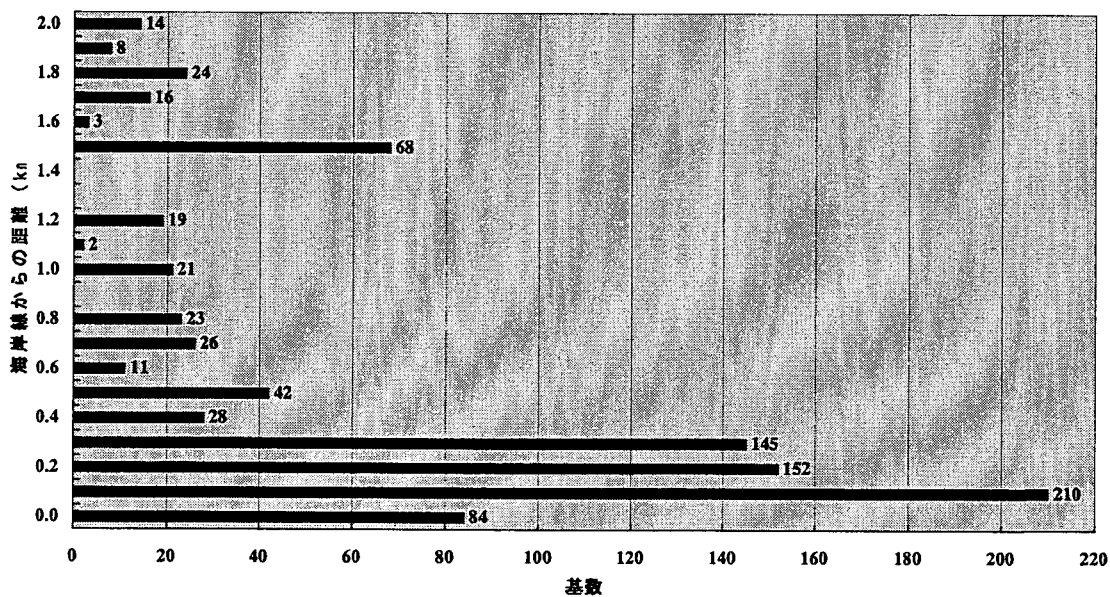


図-5.2.10 海岸線からの距離別RC橋台およびRC・SRC橋脚数（塩害地域区分B）
（定期点検（近接）実施済）

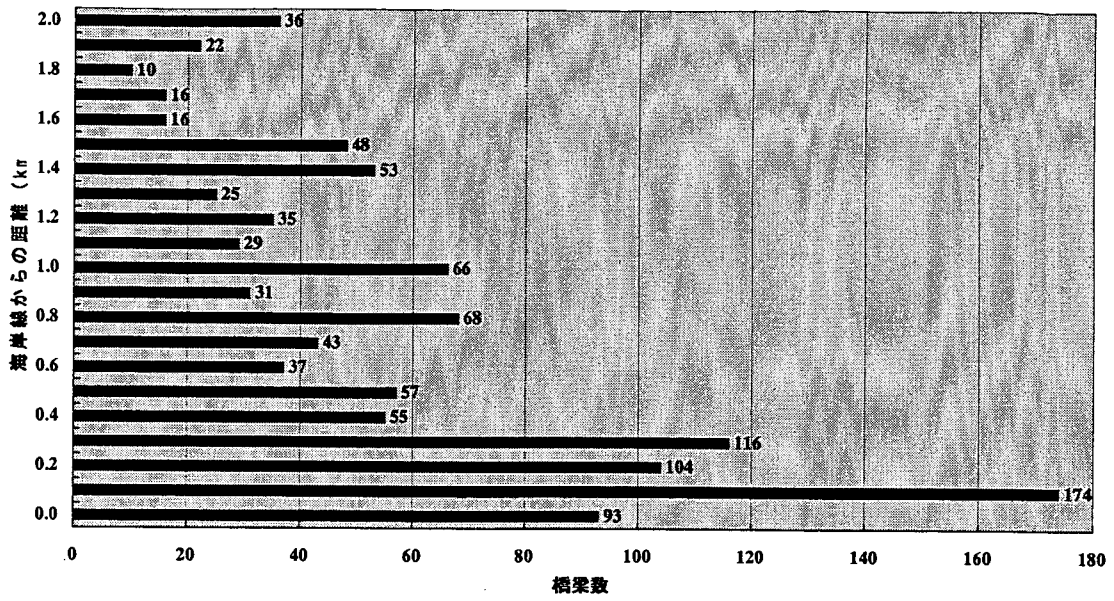


図-5.2.11 海岸線からの距離別橋梁数（塩害地域区分C）
（定期点検（近接）実施済）

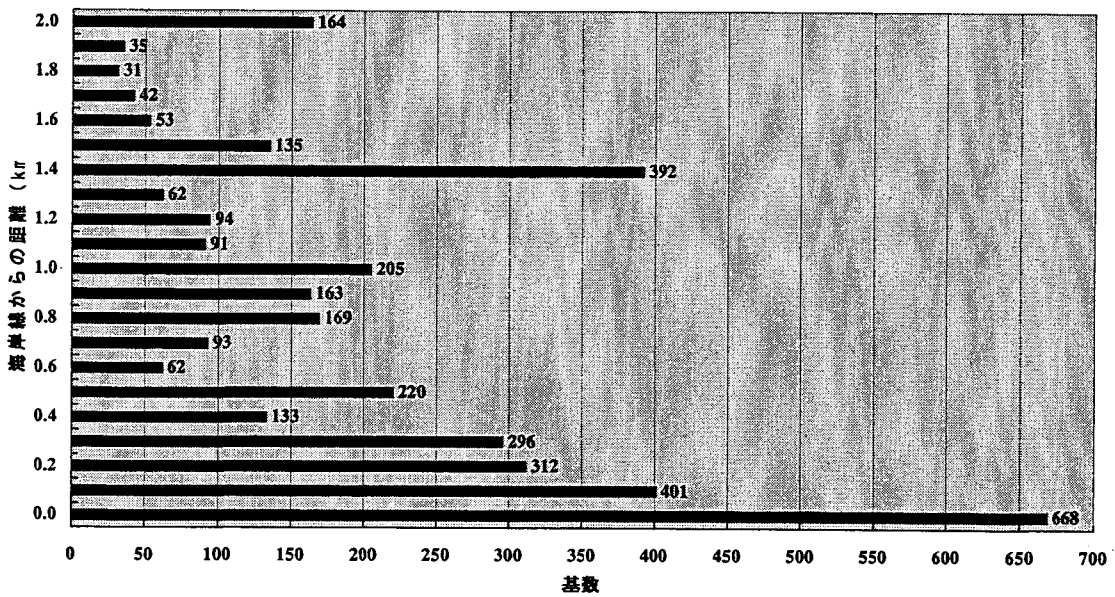


図-5.2.12 海岸線からの距離別RC橋台およびRC・SRC橋脚数（塩害地域区分C）
（定期点検（近接）実施済）

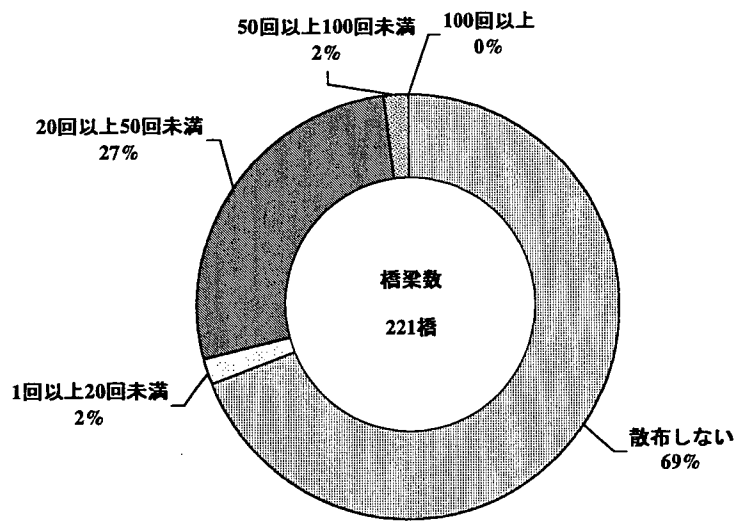


図-5.2.13 凍結防止剤散布回数別橋梁数（塩害地域区分B）
（定期点検（近接）実施済）

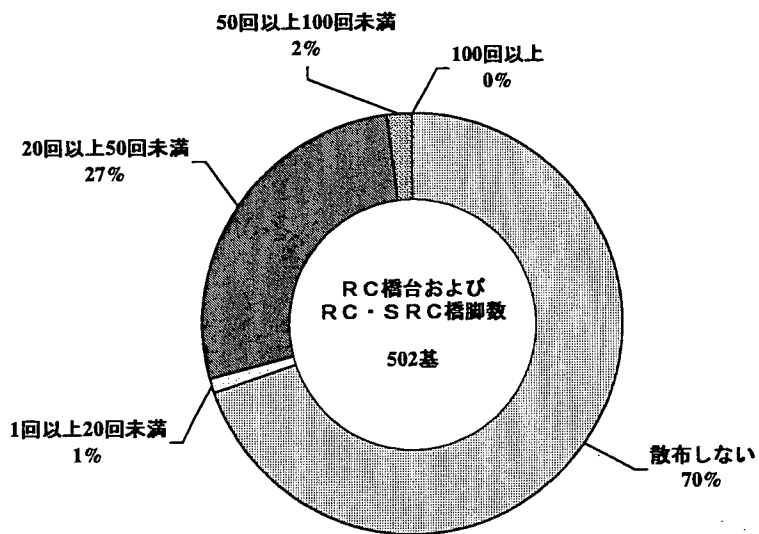


図-5.2.14 凍結防止剤散布回数別RC橋台およびRC・SRC橋脚数（塩害地域区分B）
（定期点検（近接）実施済）

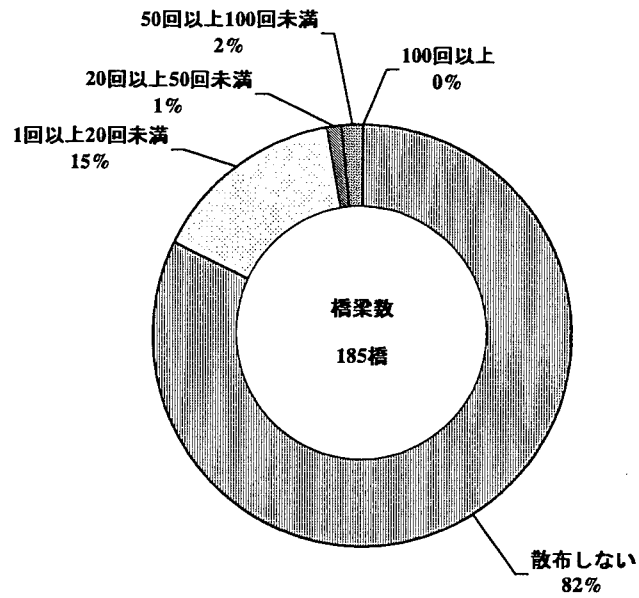


図-5.2.15 凍結防止剤散布回数別橋梁数（塩害地域区分C）
（定期点検（近接）実施済）

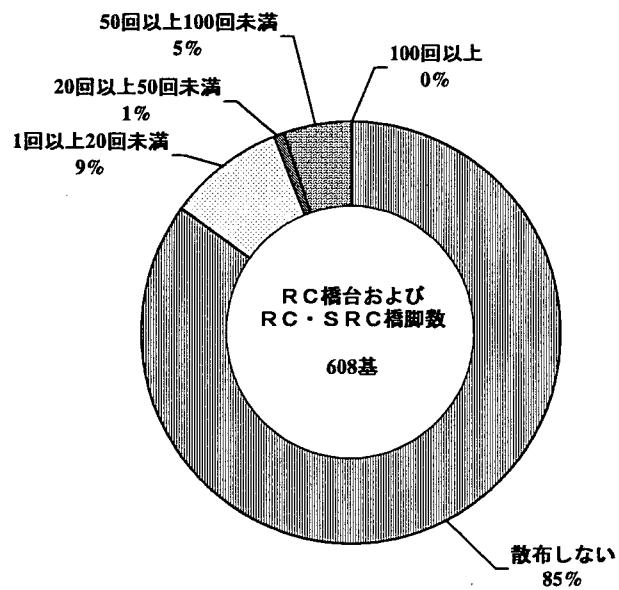


図-5.2.16 凍結防止剤散布回数別RC橋台およびRC・SRC橋脚数（塩害地域区分C）
（定期点検（近接）実施済）

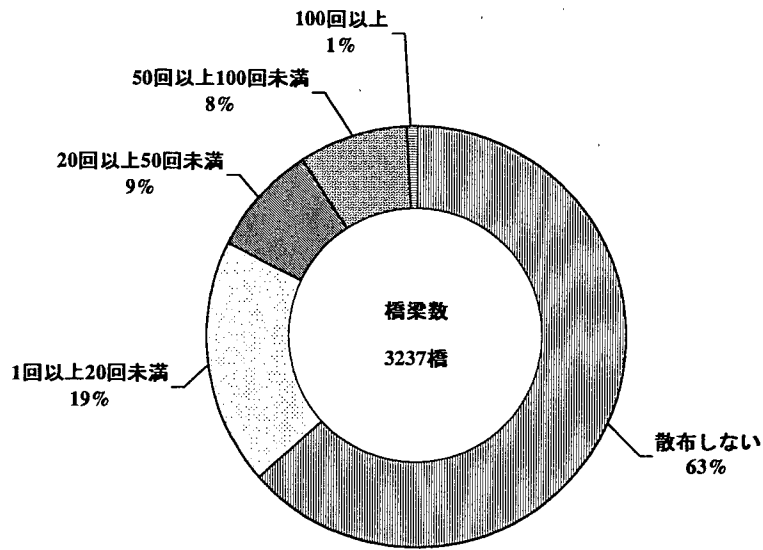


図-5.2.17 凍結防止剤散布回数別橋梁数（塩害地域区分A～C以外）
（定期点検（近接）実施済）

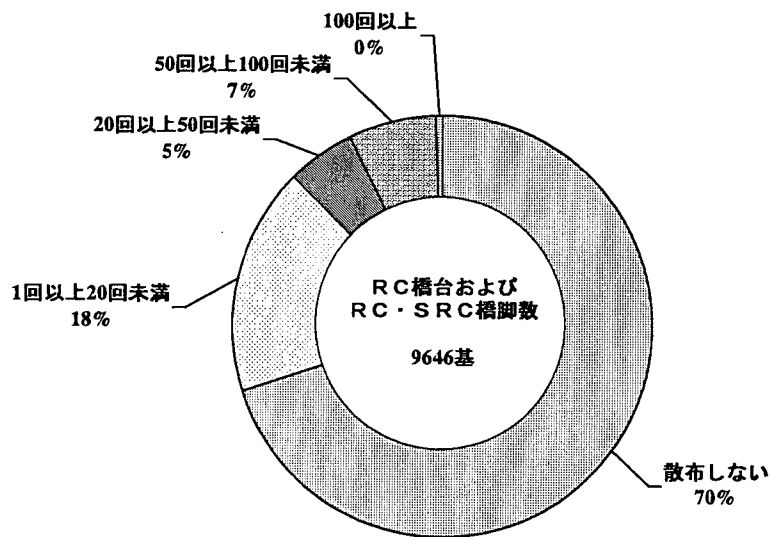


図-5.2.18 凍結防止剤散布回数別RC橋台およびRC・SRC橋脚数（塩害地域区分A～C以外）
（定期点検（近接）実施済）

5.1.3 損傷事例の整理

(1) 地域、海岸線からの距離、供用年数、損傷度に関する相関の整理

各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局が管理する橋梁について、橋梁諸元等データと橋梁定期点検（近接）結果データの組み合わせにより、下部構造を塩害地域区分および損傷の種類別に抽出し、それらの海岸線からの距離、供用年数、損傷度との関係を整理した。

損傷の種類は、塩害との関連性が考えられる「ひび割れ」、「剥離・鉄筋露出」、「遊離石灰」の3種類を考慮している。下部構造は、「RC橋台」と「RC・SRC橋脚」の2種類を対象とし、塩害地域区分とこれら損傷の種類別に整理している。

なお、ここでいう塩害地域区分BおよびCは、海岸線からの距離に応じた損傷の実態を把握するため、S59塩対指針（案）の区分に属する地域・県的全範囲を対象（塩害地域区分Aはいずれも沖縄県全県が対象）としている。

また、供用年数は、点検調査年から架設竣工年を差し引いた年数と定義している。

整理した結果は、供用年数を縦軸、海岸線からの距離を横軸（対数軸）とする散布図に表しており、これらを図-5.3.1～5.3.27（第2回塩害調査（2000年実施）の下部構造における調査結果は図-5.3.28～5.3.30）に示す。海岸線からの距離に関係なく損傷度Ⅱがばらつくケースも多々見られるが、使用したデータには損傷原因を特定する情報は含まれておらず、塩害による損傷とそれ以外による損傷を区別できないのが実状である。

(2) 下部構造各部材の損傷事例の整理

架設地点が塩害地域区分Bに属する北陸地方整備局管内の下部構造の損傷データから、代表的な損傷事例を「損傷事例1～10」として巻末の付属資料-5に示す。主な損傷例は「ひび割れ」、「剥離・鉄筋露出」、「遊離石灰」の3種類を考慮し、下部構造はRC橋台、RC橋脚の2種類を対象としている。

また、損傷事例の調書内容は、橋梁の架設環境を把握するために地域区分、対策区分、海岸線からの距離、凍結防止剤の散布回数を考慮し、また、下部工、上部工の形式、施工年（経過年数）、上部工の補修の有無とした。

(3) 下部構造の損傷の傾向把握

北陸地方整備局管内における塩害地域区分B、対策区分Iに属する5橋の中の全ての橋脚数の56橋脚について、ひび割れ、剥離・鉄筋露出の損傷ランクの頻度を整理した。（表-5.3.1参照）

表-5.3.1 塩害地域区分B・対策区分Iに属する橋脚の損傷ランク
(北陸地方整備局管内における5橋の事例)

	橋脚数	経過年数	梁			
			ひびわれ		剥離・鉄筋露出	
			ランクⅡ	ランクⅢ	ランクⅡ	ランクⅢ
A橋	16	29	4	12	1	3
B橋	31	26	25	6	6	6
C橋	4	35	4	0	1	0
D橋	3	34	1	0	0	0
E橋	2	39	0	2	0	1
合計橋脚数	56		34	20	8	10
比率			61%	36%	14%	18%
全体比率			96%		32%	

上表でランクⅡ、Ⅲの損傷を複数有する橋脚は、損傷度の大きいランクⅡの損傷として整理している。

上表より、ほとんどの橋脚でひびわれが発生しており、剥離・鉄筋露出まで進行している橋脚が約3割となっている。また、5橋の上部工は全て上部工の補修対策が行われており、4橋においては補修後もひびわれ、剥離の損傷が見られる。

橋脚数の多いA、B橋が耐震補強を行っているため、損傷部位はほとんど梁部材である。上表より、ランクⅡのひびわれは約6割程度見られ、梁部材における亀甲状のひびわれが多く、全体的に発生しているものから、部分的に発生しているものまであり、発生位置については特定できない。ランクⅢのひびわれは一方のひびわれがほとんどであり、「損傷事例1,2,9」のように梁の上縁と下縁に沿ったひびわれが18橋脚の梁部材に発生している。上記橋梁のひびわれ、剥離・鉄筋露出については、アルカリ骨材反応によりひびわれが発生し、塩害により損傷が進行したと考えられるものもあり、原因については詳細な調査が必要である。

5.1.4 上部構造の損傷度と下部構造の損傷度との関係の整理

(1) 塩害対策区分と供用年数に着目した整理

同一径間内の上部構造の損傷データと下部構造の損傷データを抽出し、塩害地域区分と供用年数に着目した損傷度の相関関係を整理した。

上部構造の損傷データは、「コンクリート主桁」、「コンクリート横桁」、「コンクリート縦桁」、「コンクリート床版」(コンクリート系の橋梁のみ対象)の各部材について確認された「ひび割れ」、「剥離・鉄筋露出」、「遊離石灰」、「床版ひび割れ」の4種類の損傷を考慮している。下部構造の損傷データについては、5.3(1)項と同じである。

整理した結果は、塩害地域と塩害の影響がない地域に区分しており、これらを図-5.4.1~5.4.10に示す。ここで、塩害地域はS59 塩対指針(案)で規定しているいずれかの地域区分に該当するものであり、塩害の影響がない地域はそのいずれにも該当しないものとしている。

図-5.4.1(図-5.4.3)と図-5.4.2(図-5.4.4)との対比では、上部構造の損傷度と下部構造の損傷度との相関関係について、塩害地域と塩害の影響がない地域との間に大差はなく、上部構造の損傷度が高ければ下部構造の損傷度も高い傾向となっている。

図-5.4.5~5.4.7は、上部構造の損傷度と下部構造の損傷度との各組み合わせについて、それらの供用年数別の分布を表したものである。これによれば、塩害地域では供用年数がおおむね20~30年の間に集中しているのに対して、塩害の影響がない地域ではこのようなピークは見当たらず、供用年数がおおむね20~45年の間の長期間に渡ってなだらかに分布している。

さらに、図-5.4.5~5.4.7における上部構造の損傷度と下部構造の損傷度との各組み合わせについて、上部構造の損傷度の方が上位、上部構造の損傷度と下部構造の損傷度が同等、下部構造の損傷度の方が上位の3種類にグルーピングした結果を図-5.4.8~5.4.10に示す。これによれば、上部構造の損傷度は供用年数にかかわらず、下部構造の損傷度に比べて同等ないしは上位にあり、上部構造の損傷が相対的に先行する傾向にあることが伺える。

(2) 凍結防止剤散布回数と供用年数に着目した整理

(1) 項の整理について、塩害地域区分の代わりに凍結防止剤散布回数に着目し、上部構造の損傷度と下部構造の損傷度との相関関係を整理した。

整理した結果は、(1) 項と同様に塩害地域と塩害の影響がない地域に区分しており、上部構造の損傷度別に整理したものを図-5.4.11~5.4.19、下部構造の損傷度別に整理したものを図-5.4.20~5.4.28に示す(塩害地域における凍結防止剤散布回数50回以上100回未満は抽出したデータ数(母数)が非常に少ないため参考とならない)。

これによれば、上部構造の損傷度と下部構造の損傷度との相関関係について、上部構造の損傷度が高くても下部構造の損傷度が高いとは限らないが、下部構造の損傷度が高いと上部構造の損傷度も高い傾向となっている。また、凍結防止剤を散布する環境下では、塩害地域の方が塩害の影響がない地域に比べて上部構造、下部構造ともに損傷度が高い傾向となっている。一方、凍結防止剤散布回数別に見ると、下部構

造では、塩害地域と塩害の影響がない地域との別にかかわらず、その回数の増加に伴って損傷度が高い傾向となっている。上部構造の損傷度については、塩害地域ではその傾向が顕著となっているが、塩害の影響がない地域では鈍化する。

これらのことから、凍結防止剤の散布が下部構造の損傷の一因となっており、塩害地域では損傷を助長する原因となっていることが伺える。

5.1.5 コンクリートの設計基準強度、かぶり、使用セメントの種類と損傷度との関係の整理

(1) 技術基準の変遷

道路橋の下部構造に関する技術的な基準は、1964年（昭和39年）に刊行された道路橋下部構造設計指針「くい基礎の設計編」が最初である。それ以前にも相当する技術基準はあるが、計画や荷重などに関する規定が主であり、具体的な設計基準や施工基準は見当たらない。その他に設計の拠り所になったものに土木学会のコンクリート標準示方書があるが、設計・施工は各設計・施工担当者の判断により行っていたのが通常であり、経験を重視した設計が主体であった。

鉄筋コンクリートの設計基準強度は、1965年（昭和40年）に建設省制定土木構造物標準設計（以下、標準設計と表す）が制定されていることもあって実態は明らかでないが、技術基準としては、1980年（昭和55年）に道路橋示方書IV下部構造編の規定が整備され、最低設計基準強度を18N/mm²から21N/mm²とすることが規定されている。これは、現在の鉄筋コンクリートの最低設計基準強度と同じである。

構造細目の一つである鉄筋の最小かぶりは、1956年（昭和31年）のコンクリート標準示方書に規定されて以降、1980年（昭和55年）になって道路橋示方書IV下部構造編に規定が整備された。鉄筋の最小かぶりに関する技術基準の変遷を表-5.5.1に示す。

表-5.5.1 鉄筋の最小かぶりに関する技術基準の変遷

年	示方書	最小かぶり
1956年 (昭和31年)	コンクリート標準示方書	はり 2.5cm 柱 3.0cm フーチング 7.0cm
1967年 (昭和42年)	コンクリート標準示方書	同上
1974年 (昭和49年)	コンクリート標準示方書	同上
1980年 (昭和55年)	道路橋示方書IV下部構造編	はり 3.5cm 柱 4.0cm フーチング 7.0cm
1990年 (平成2年)	道路橋示方書IV下部構造編	同上
1996年 (平成8年)	道路橋示方書IV下部構造編	同上

※「保全技術者のための橋梁技術の変遷：平成11年7月、(財)道路保全技術センター道路構造物保全研究会」表7-3に基づく。

使用セメントの種類については、逆T式橋台、張出し式橋脚、壁式橋脚等、構造が比較的単純な下部構造については現在、温度応力によるひびわれ防止、およびアルカリ骨材反応抑制対策に加え、経済性を考慮し、高炉セメントB種の使用が主となっている。

高炉セメントは、昭和50年代当初は年間生産量約260万トン（全セメント生産量の4%）であったが、平成2年度には約1,480万トン（全セメント生産量の17%）と大幅に増加しており、そのほとんどがB種となっている。技術基準としては、それまでポルトランドセメントの使用に限定した規定となっていたが、1990年（平成2年）に道路橋示方書I共通編が改訂され、クリープや乾燥収縮の影響を考慮する必要がある上部構造には使用が制限されるものの、新たに高炉セメントの使用の規定が加えられている。

ただし、コンクリートの設計基準強度、かぶり、使用セメントについては、各地方整備局等が道路橋示方書等の技術基準に対する設計・施工の統一的な運用を図るために制定している要領・マニュアル類の中に具体的な標準使用区分が定められている。

(2) コンクリートの設計基準強度、かぶりの実態と建設省制定土木構造物標準設計との関係

標準設計は、1965年（昭和40年）に制定されて以来、1995年（平成7年）に発生した兵庫県南部地震の後、道路橋示方書の大改訂が行われるまでの間、広く一般に活用されてきた。

標準設計に収録されている橋台・橋脚は、橋台が重力式と逆T式、橋脚が張出し式と壁式である。標準設計は制定後、昭和51年度（1976年度）と昭和57年度（1982年度）の二度に渡って改訂されているが、少なくとも昭和51年度の改訂以降、鉄筋コンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 とし、鉄筋はコンクリート表面から鉄筋中心までの距離を100mm（または105mm）として最小かぶりを70mm以上確保するという設計上の考え方を採っている（図-5.5.1参照）。

標準設計における設計の考え方は、各地方整備局等が制定している要領・マニュアル類の中に反映されている。東北地方整備局では、昭和43年度から要領・マニュアル類の整備が行われているが、その中で入手できた資料として最も古い昭和61年版（1986年版）に記載されるコンクリートの設計基準強度の使用区分を表-5.5.2に示す。鉄筋の最小かぶりについては図-5.5.1と同じである。

なお、現在は、1996年（平成8年）の道路橋示方書の大改訂に伴う帯鉄筋をはじめとする配筋方法の大幅な変更や、1999年（平成11年）の国土交通省土木構造物設計マニュアル（案）の適用などに伴い、従来の標準設計は用いられていない。直轄国道の橋梁では、鉄筋コンクリートの設計基準強度を $\sigma_{ck} = 24\text{N/mm}^2$ とし、鉄筋は最小かぶりが70mm以上確保できるようにコンクリート表面から鉄筋中心までの距離を150mmとすることが標準とされている。

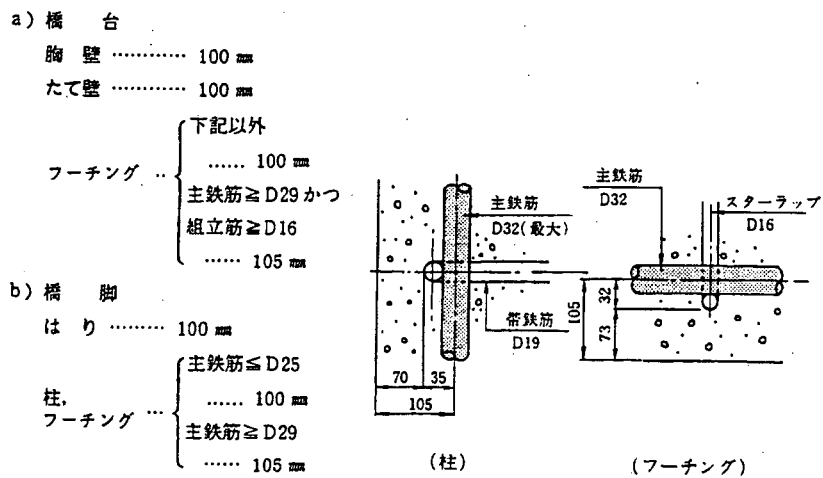


図-5.5.1 従前の鉄筋の最小かぶり

※「建設省制定土木構造物標準設計第6～12巻（橋台・橋脚）解説書：（社）全日本建設技術協会、昭和58年2月」

表-5.5.2 従前のコンクリートの設計基準強度

	使用区分
$\sigma_{ck}=16\text{N/mm}^2$	均しコンクリート、重力式および半重力式の橋台、橋脚
$\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$	上記以外の橋台、橋脚、井筒
$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	ラーメン構造の橋台、橋脚、場所打ち杭

※「設計マニュアル(案)：東北地方整備局、昭和61年6月」表5-1

(3) 損傷度との関係

○鉄筋コンクリートの設計基準強度

1980年(昭和55年)に道路橋示方書IV下部構造編の規定が整備されており、鉄筋コンクリートの最低設計基準強度の規定は現在と同等の 21N/mm^2 となっているが、実態としてはその数～10年前から現在と同等としていた可能性は十分に考えられる。

塩害の代表的な損傷状態である剥離・鉄筋露出に着目すると、供用年数20年以下では損傷度Ⅱのものはわずかとなっている。供用年数20年以下のものは、古いものでも架設竣工年が1970年(昭和45年)前後であり、設計基準強度が 21N/mm^2 である可能性は相対的に高い。ただし、ひび割れ等の経年劣化の影響も受けるため、相関関係が明らかとなるまでに至らない。

○かぶり

従来、技術基準では部位・部材ごとに最小かぶりが設定されているが、少なくとも標準設計の制定後は、コンクリート表面から鉄筋中心までの距離を100mm(または105mm)とし、鉄筋は最小かぶりを70mm以上確保していると考えられる。

標準設計の最小かぶりは、S59 塩対指針(案)の対策区分のうち、最も厳しいA-Iに相応しているが、塩害の代表的な損傷状態である剥離・鉄筋露出に着目すると、塩害地域において供用年数10～20年程度で損傷を受けているものもあり、最小かぶりが十分でない可能性も考えられる。

○使用セメントの種類

下部構造において高炉セメントの使用が一般化されたのは1990年(平成2年)以降と考えられ、供用年数が10年に満たないものが大半を占める。使用セメントの種類と損傷度との関係については、実態を整理するのに十分な時間を経過していない。

5.2 拡散理論による必要かぶりの算出

5.2.1 損傷事例調査結果に対する試算

ここでは、橋梁下部工損傷実態調査結果において、コンクリート強度(W/C)、設計かぶり、海岸線からの距離をパラメータとして試算した鉄筋が腐食しはじめる年数と損傷度との関係について整理を行う。それを踏まえた上で、塩害対策として必要な設計かぶりについて検討を行う。検討時の試算条件は以下のとおりとする。

5.2.2 試算条件

(1) コンクリート強度（水セメント比）

コンクリート強度における水セメント比は以下のように設定する。

- W/C = 50.0 % ($\sigma_{ck} = 30\text{N/mm}^2$)
- W/C = 55.0 % ($\sigma_{ck} = 24\text{N/mm}^2$)
- W/C = 60.0 % ($\sigma_{ck} = 21\text{N/mm}^2$)

(2) 1km 換算飛来塩分量 C1（※上部工検討時の設定と同じ）

	平均	平均 + 1 σ
地域区分 A	C1 = 0.24	C1 = 1.35
地域区分 B	C1 = 0.92	C1 = 2.51
地域区分 C	C1 = 0.11	C1 = 0.44

(3) 拡散係数 Dc（※上部工検討時の設定と同じ）

$D_c = (5 \times 10^{-7}) \cdot e^{-1.6(C/W)}$: 普通ポルトランドセメント (JCI 論文データより) を使用する。

現時点では、橋梁下部構造において一般的に使用されている高炉セメントの予測式が存在しない。しかし、高炉セメントは、一般に普通ポルトランドセメントより拡散係数が低いと考えられるので、本検討では、上式の普通ポルトランドセメントの拡散係数を用いることとする。

(4) 表面塩化物イオン量 Co（※上部工検討時の設定と同じ）

$Co = 1.2 \cdot Cair^{0.4}$: 表面塩化物イオン量 (NaCl 換算の場合)

$Cair = C1 \times d^{-0.6}$: 飛来塩分量 (mdd)、 $mdd = \text{mg/dm}^2/\text{day}$

(5) 設計かぶり

塩害区域地域別設計かぶりを以下のように設定する。

I 地域 : 90mm

II 地域 : 70mm

III 地域 : 50mm

S 地域 : I 地域 + 別途の対策

以下に S59 塩対指針 (案) にて規定されている設計かぶりを示す。

対策区分

地域区分	海岸線からの距離	対策区分
A	海上部および海岸線から100mまで	I
	上記以外の範囲	II
B	海上部および海岸線から100mまで	I
	100mをこえて200mまで	II
	200mをこえて300mまで	III
C	海上部	I
	海岸線をこえて100mまで	II
	100mをこえて200mまで	III

最小かぶり (cm)

対策区分	下部構造		備考
	梁	柱	
I	7	7	
II	5	5	
III	3.5	4	

(6) その他

Clim : 腐食発生限界塩化物イオン量 (kg/m³) = 1.2kg/m³

Cinit : コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m³) = 0.3kg/m³

設計供用期間 : 100 年

5.2.3 下部構造の検証

ここでは、先の設定条件をもとにフィックの拡散方程式を用いて、塩害区域地域別設計かぶりにおける耐用年数と海岸線からの距離との関係を整理し、以下の検討を行う。

①塩害による代表的な損傷である剥離・鉄筋露出データに塩害区域地域別設計かぶりにおける耐用年数と海岸線からの距離との関係を重ね合わせるにより、現状の塩害損傷状況の把握を行う。なお、地域区分 A については、実態データが少ないため、ここでは地域区分 B・C のみのデータを対象とすることとする。

②塩害対策としてコンクリート強度の増加、あるいは設計かぶりの増加を行った場合の効果について試算結果を用いて検証する。

・フィックの拡散方程式 (※上部工検討時の設定と同じ)

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dc \cdot t}} \right) \right\} < C_{lim} - C_{init}$$

C(x, t) : 時間 t(sec) 経過した時点でのかぶり x(cm) の位置での塩化物イオン量 (kg/m³)

Dc : みかけの拡散係数 (cm²/sec)

Co : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

$$Co = 1.2 \cdot Cair^{0.4} \quad (\text{NaCl 換算の場合})$$

$$Cair = C1 \times d^{-0.6} \quad : \text{飛来塩分量 (mdd)}, \quad mdd = \text{mg/dm}^2/\text{day}$$

Clim : 腐食発生限界塩化物イオン量 (kg/m³)

Cinit : コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m³)

Dc : 拡散係数

erf (x) : 誤差関数

拡散式による試算結果は、図-5.6.1～図-5.6.8に示す。(第2回塩害調査の試算結果は図-5.6.9～図-5.6.16に示す。)

地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=55%)

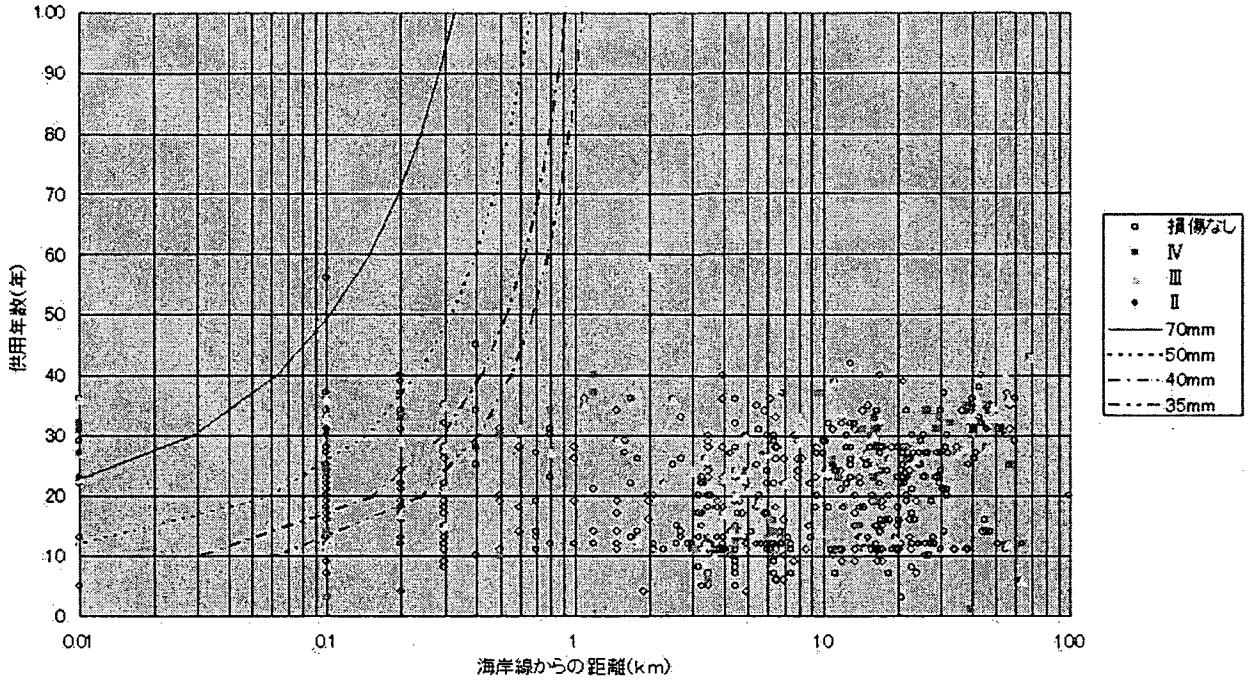


図-5.6.1 地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=55.0%、C1=0.92)

地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=55%)

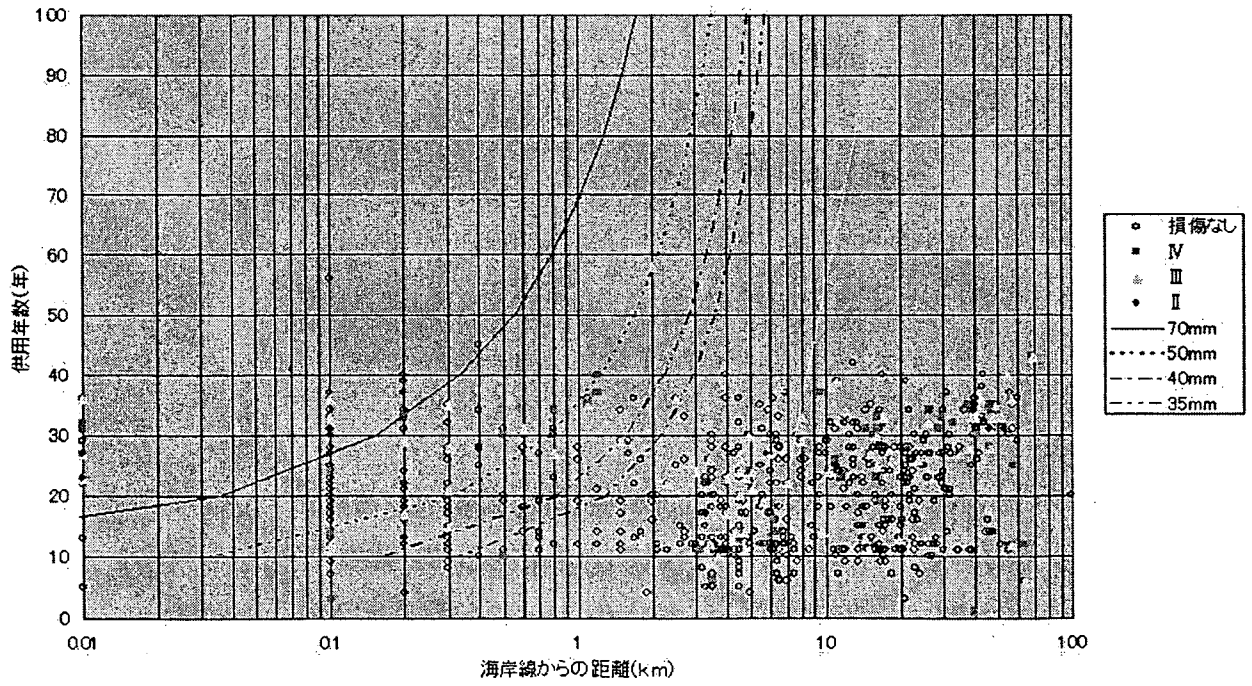


図-5.6.2 地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=55.0%、C1=2.51)

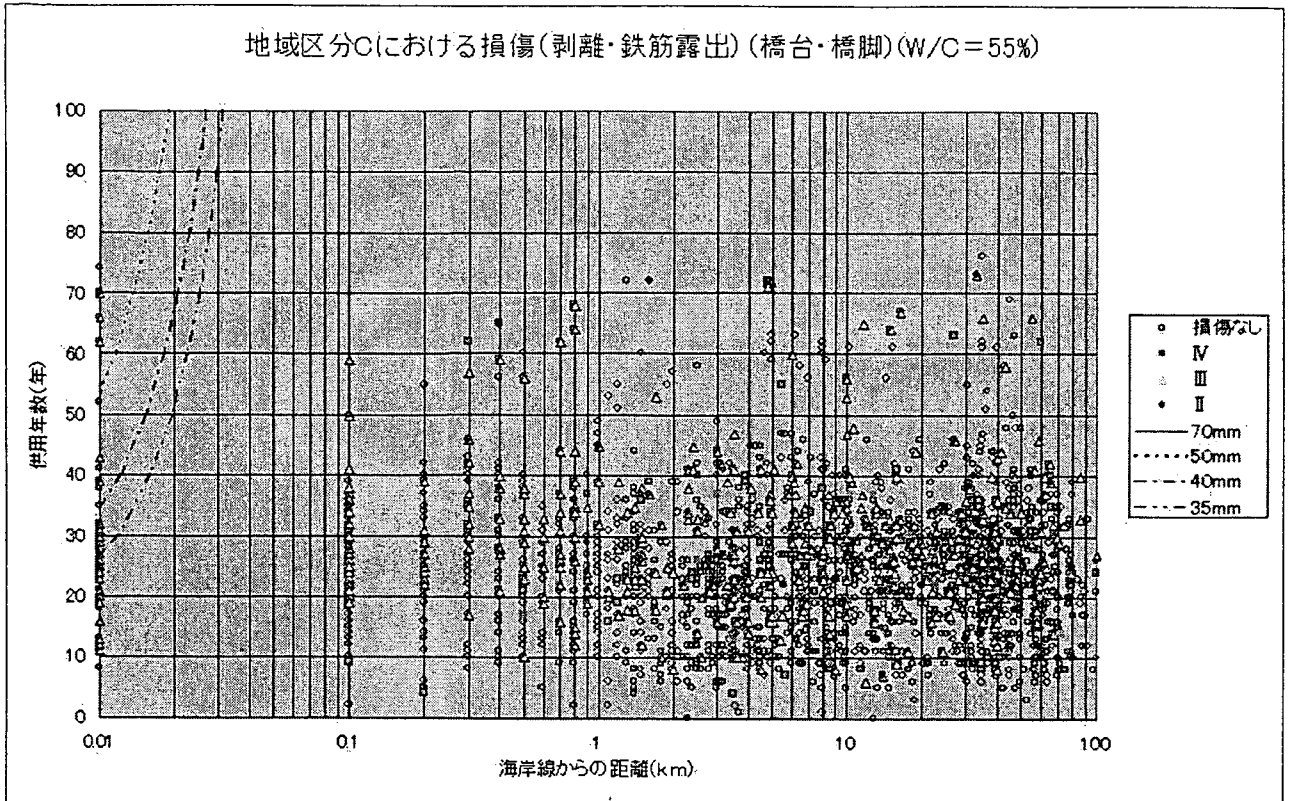


図-5.6.3 地域区分Cにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=55.0%、C1=0.11)

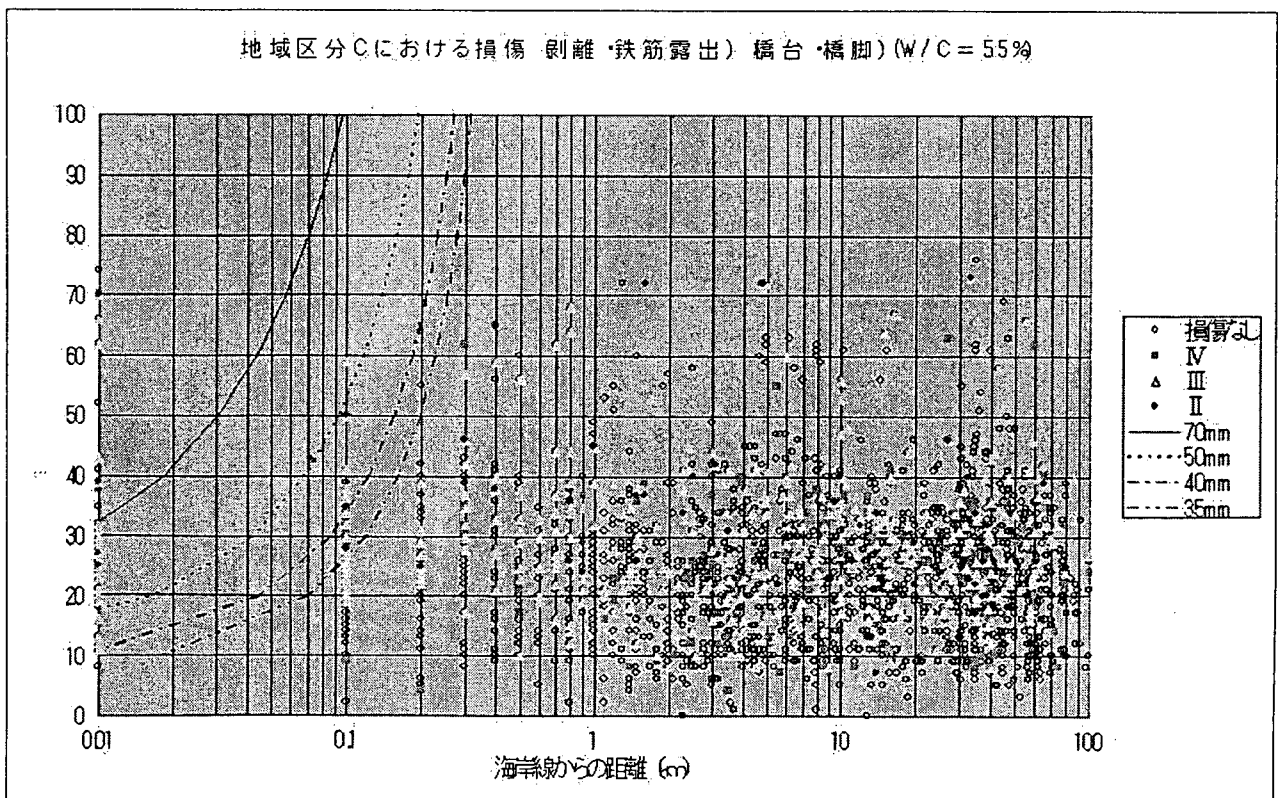


図-5.6.4 地域区分Cにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=55.0%、C1=0.44)

地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚) (W/C=60%)

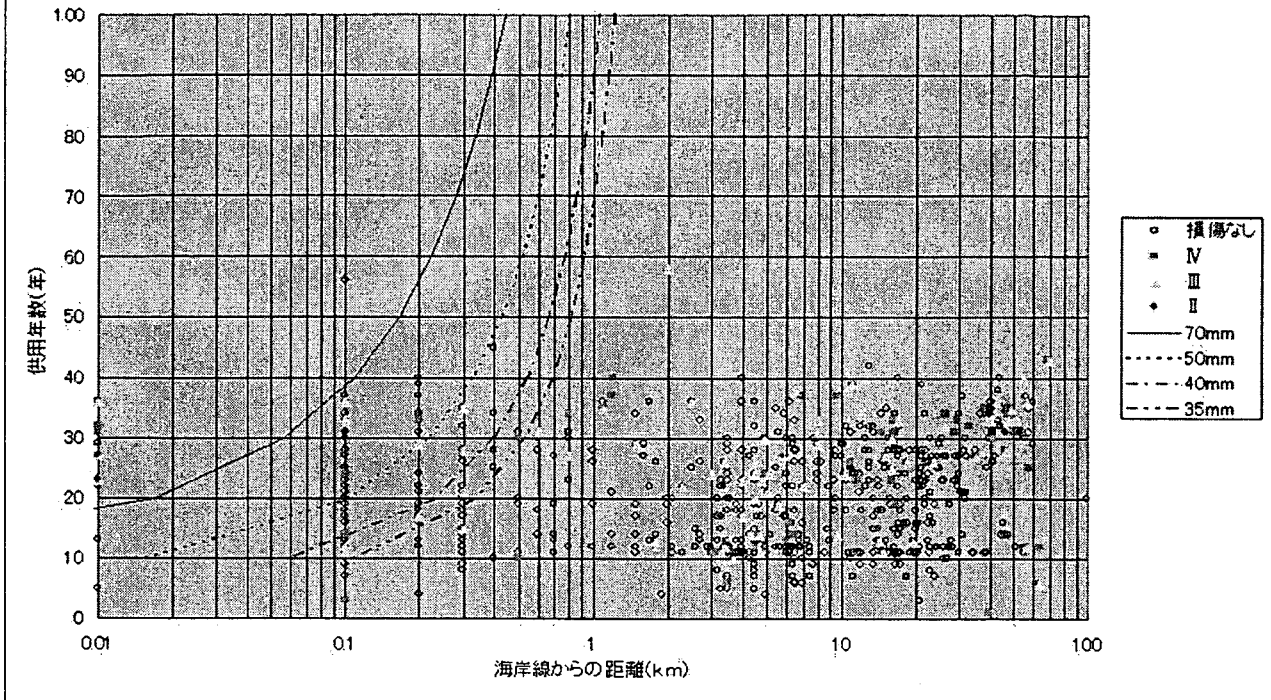


図-5.6.5 地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚) (W/C=60.0%、C1=0.92)

地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚) (W/C=60%)

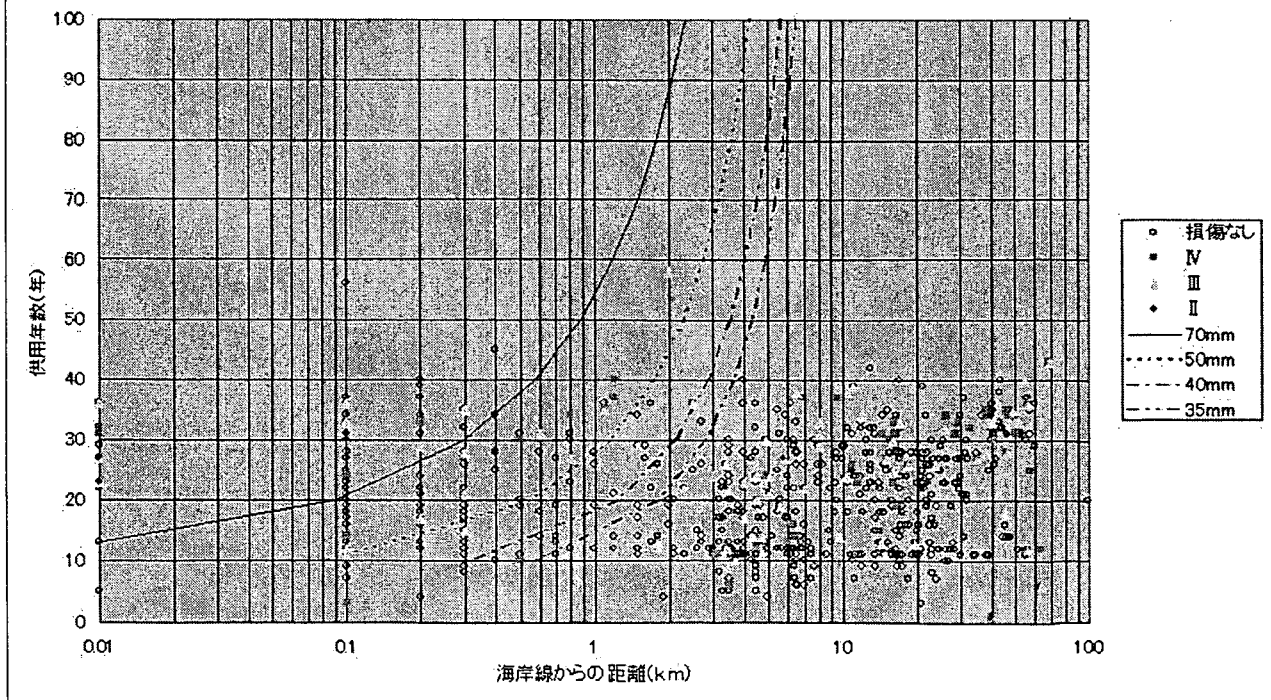


図-5.6.6 地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚) (W/C=60.0%、C1=2.51)

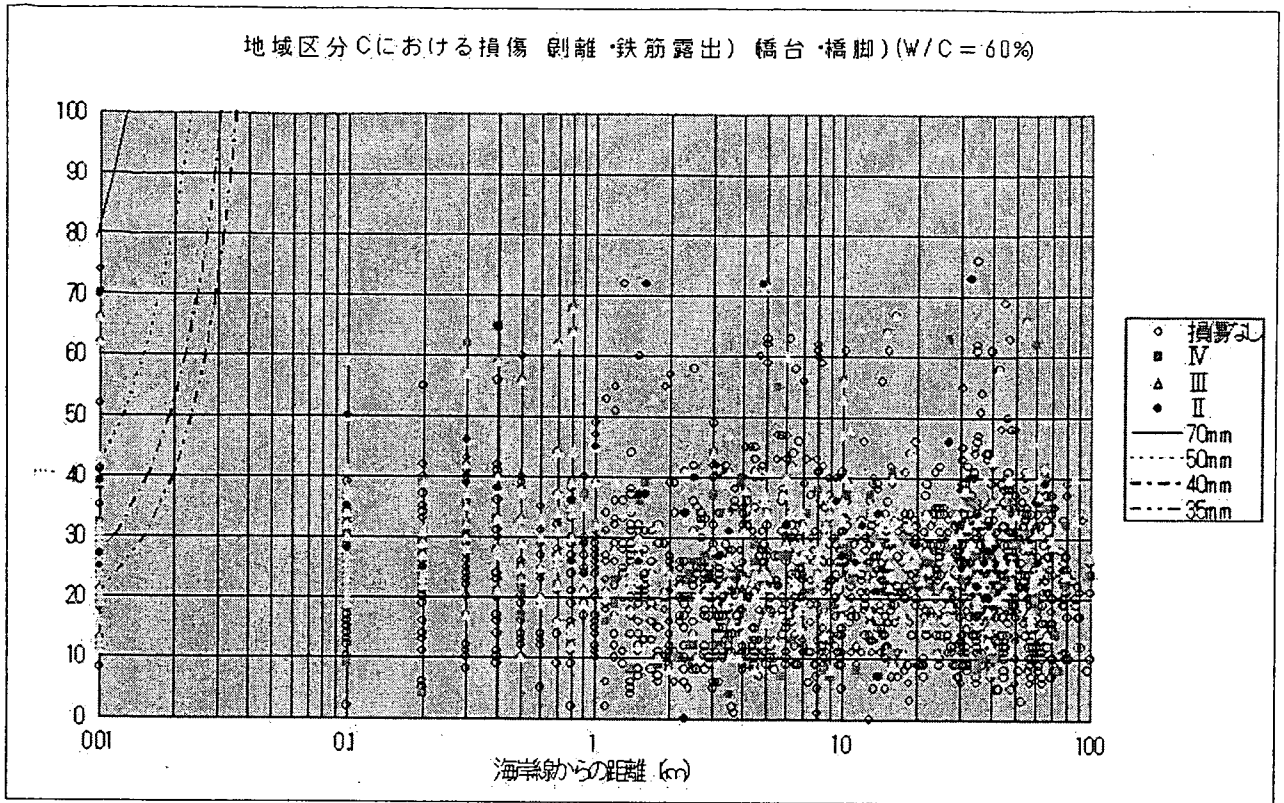


図-5.6.7 地域区分Cにおける損傷 (剥離・鉄筋露出) (橋台・橋脚) (W/C=60.0%、C1=0.11)

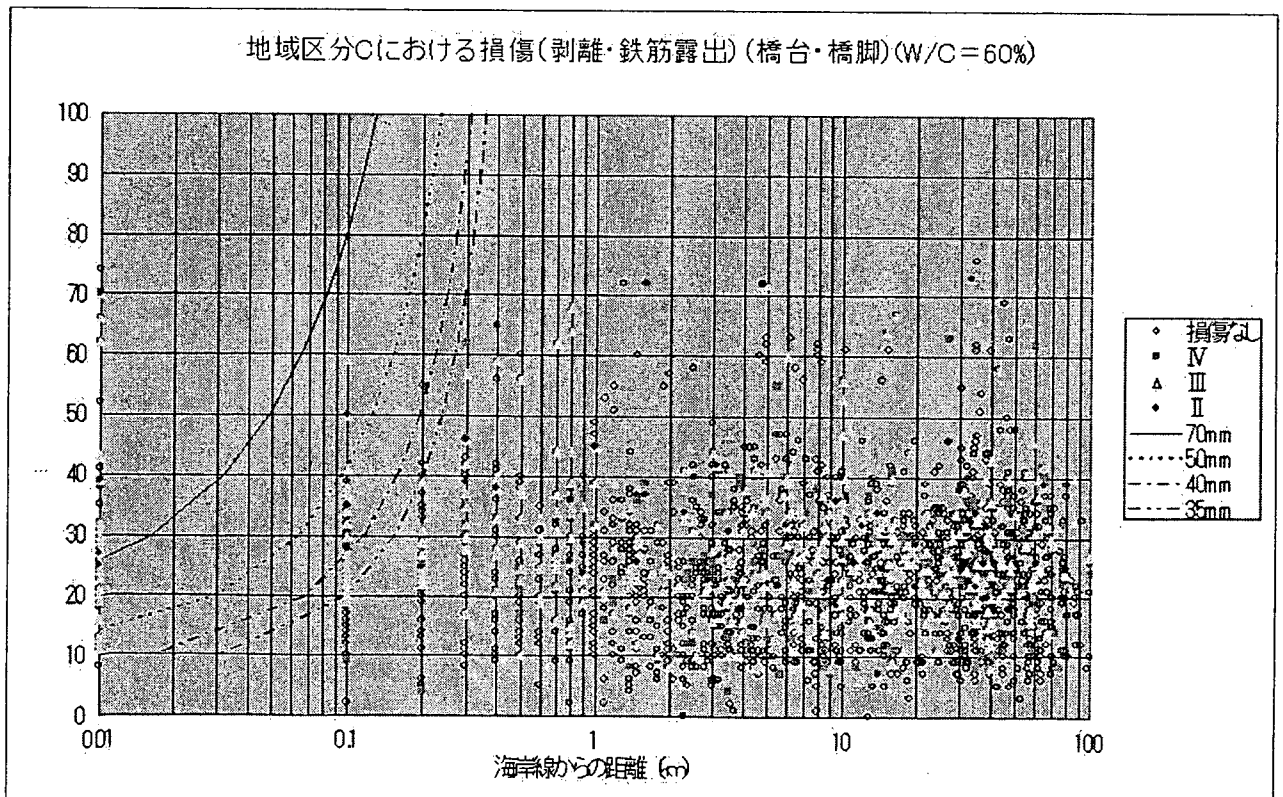


図-5.6.8 地域区分Cにおける損傷 (剥離・鉄筋露出) (橋台・橋脚) (W/C=60.0%、C1=0.44)

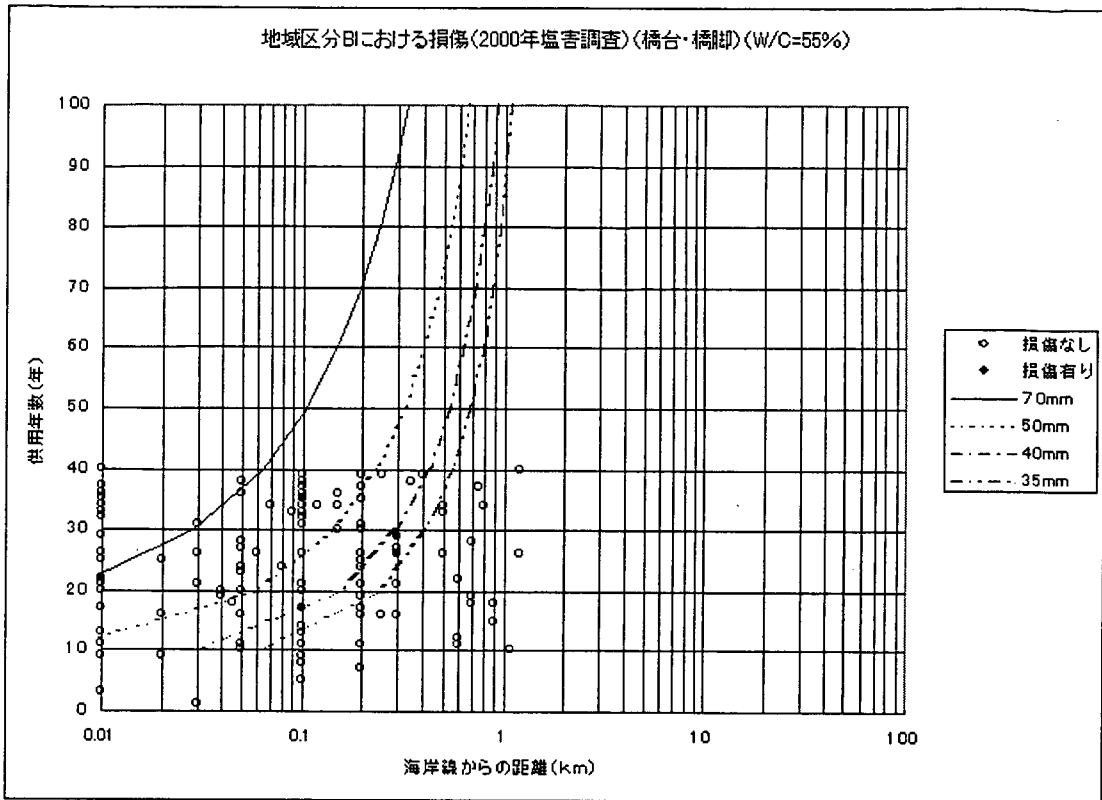


図-5.6.9 地域区分Bにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=55.0%、C1=0.92)

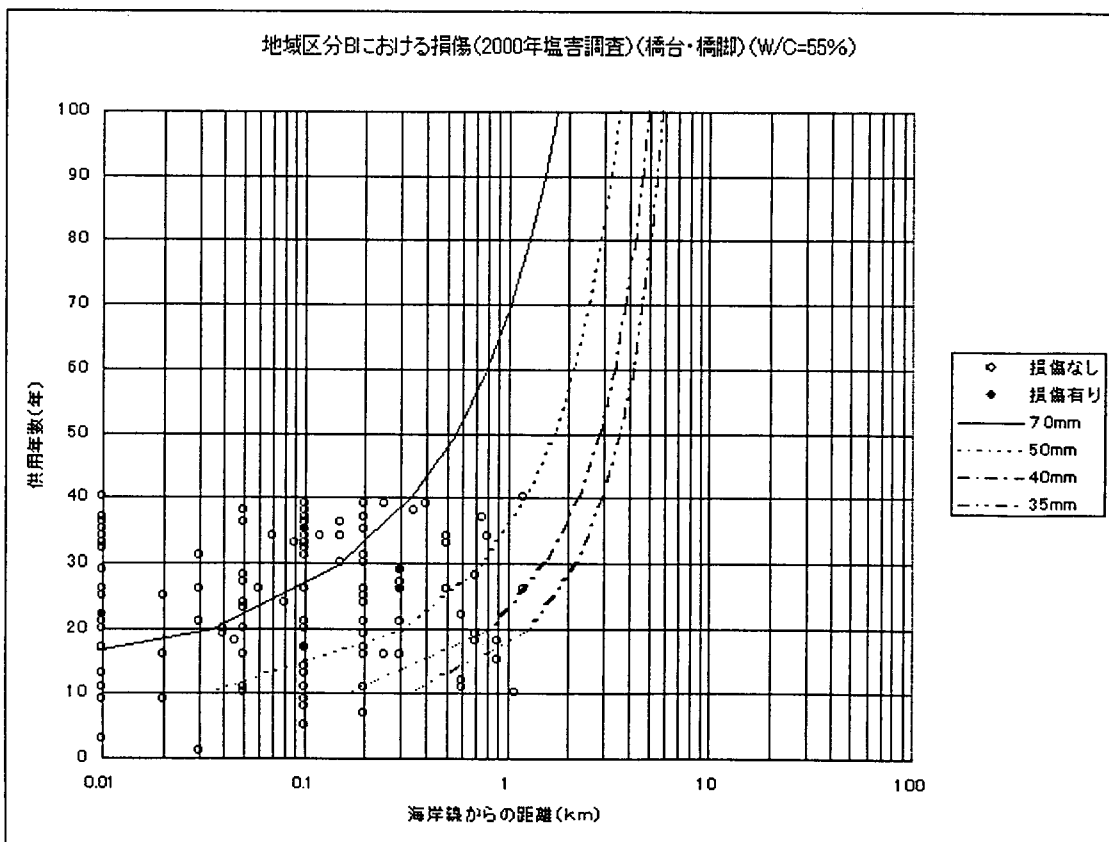


図-5.6.10 地域区分Bにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=55.0%、C1=2.51)

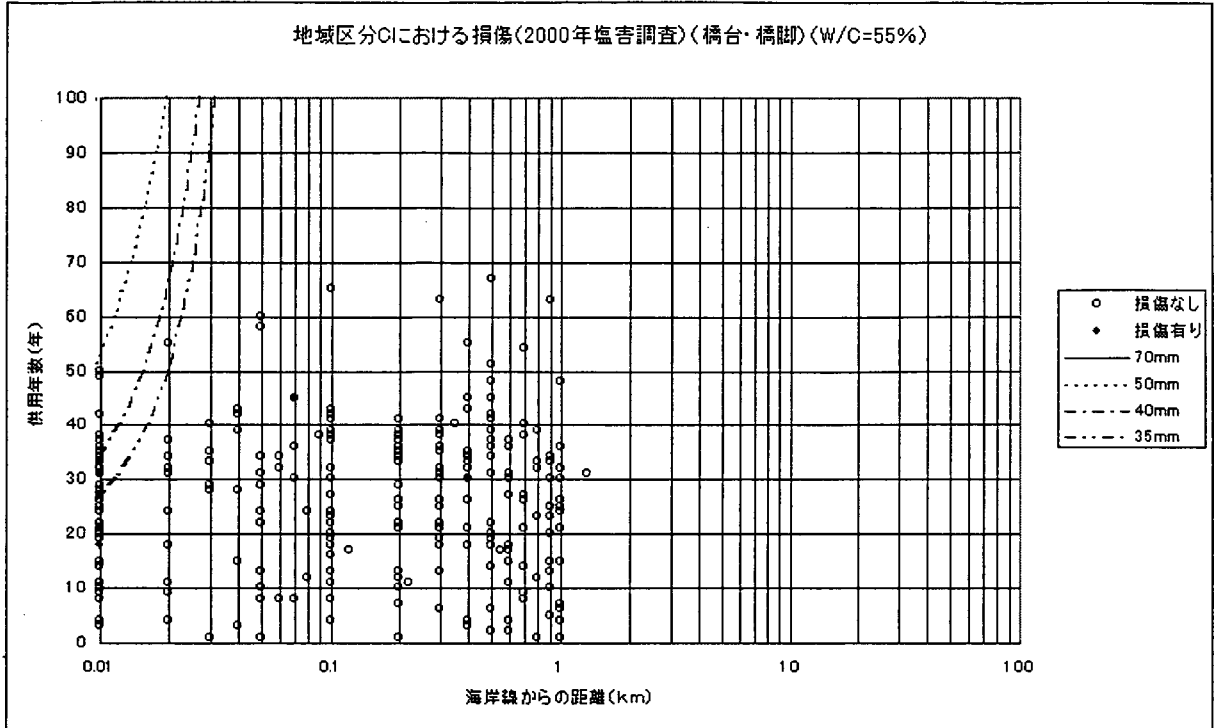


図-5.6.11 地域区分Cにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=55.0%、C1=0.92)

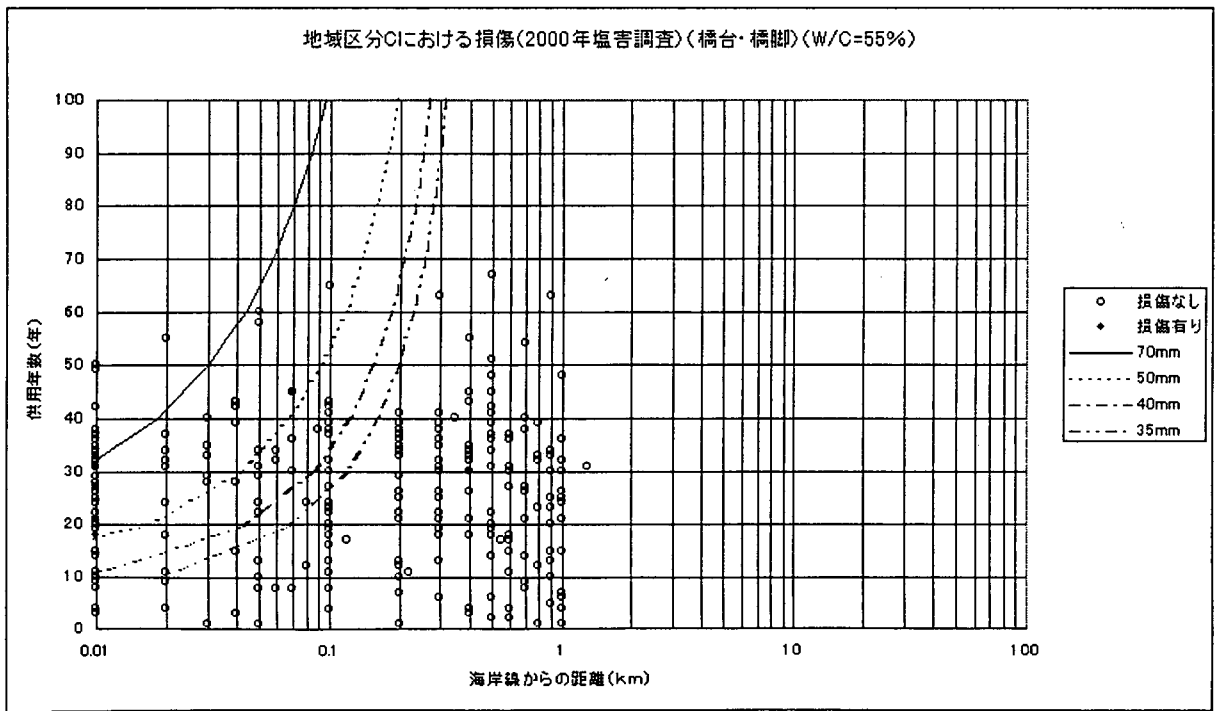


図-5.6.12 地域区分Cにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=55.0%、C1=2.51)

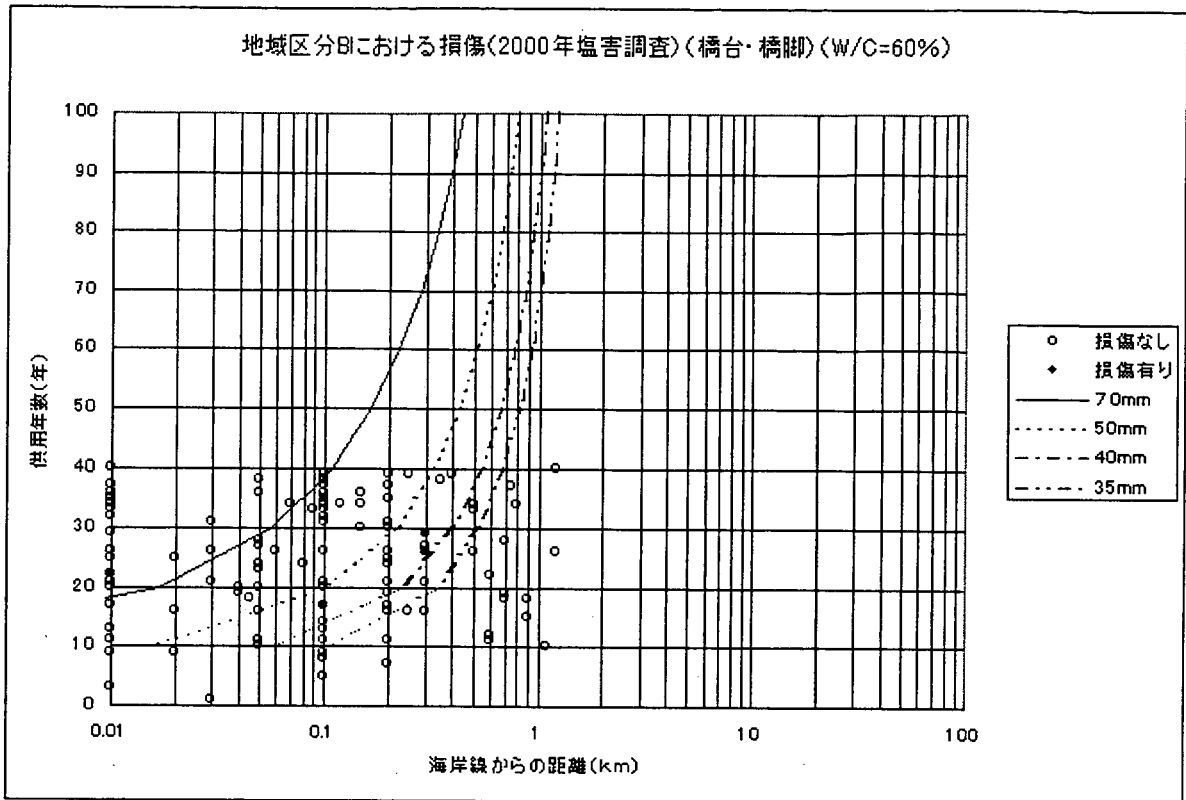


図-5.6.13 地域区分Bにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=60.0%、C1=0.92)

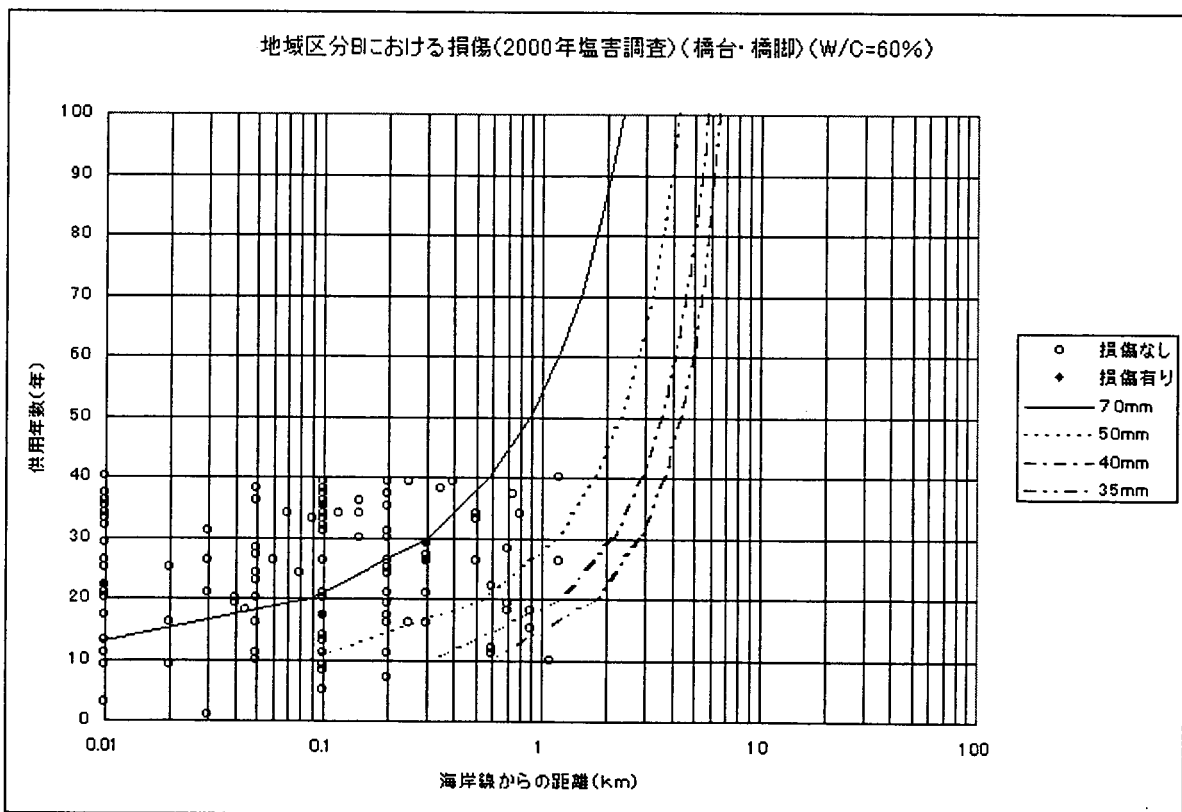


図-5.6.14 地域区分Bにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=60.0%、C1=2.51)

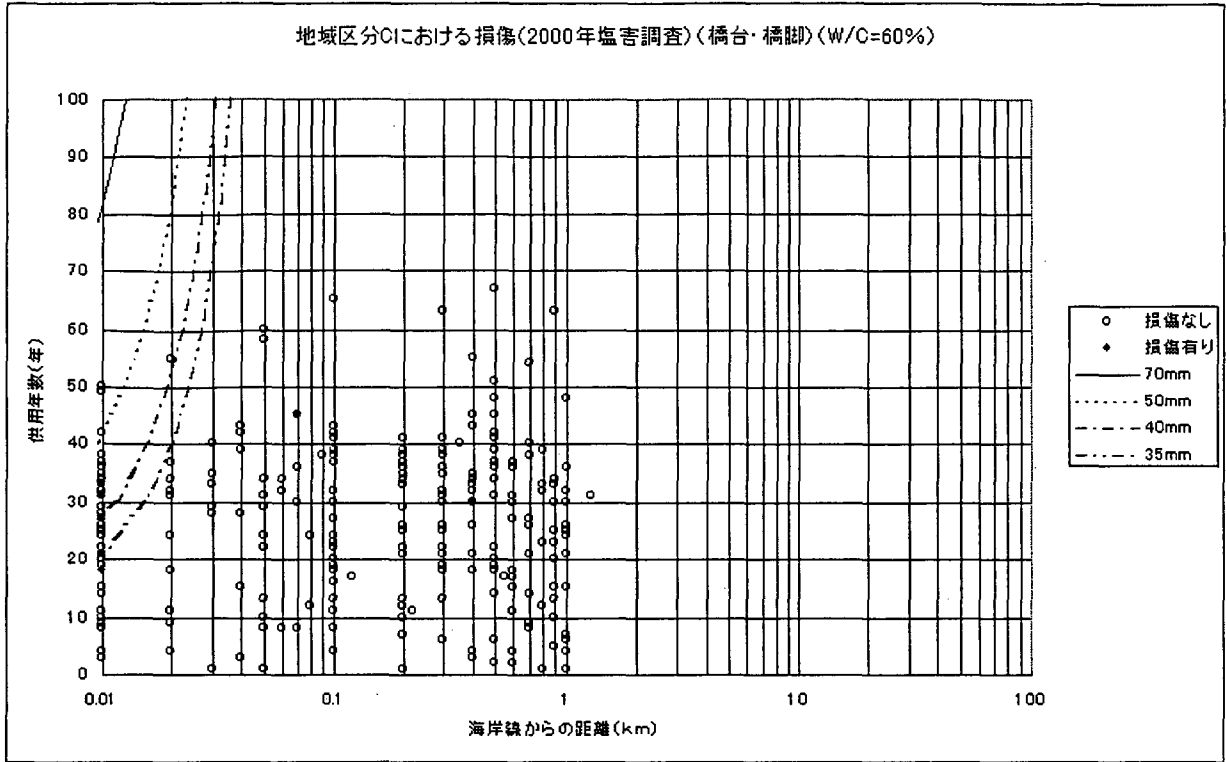


図-5.6.15 地域区分Cにおける損傷(2000年塩害調査)(橋台・橋脚)(W/C=60.0%、C1=0.92)

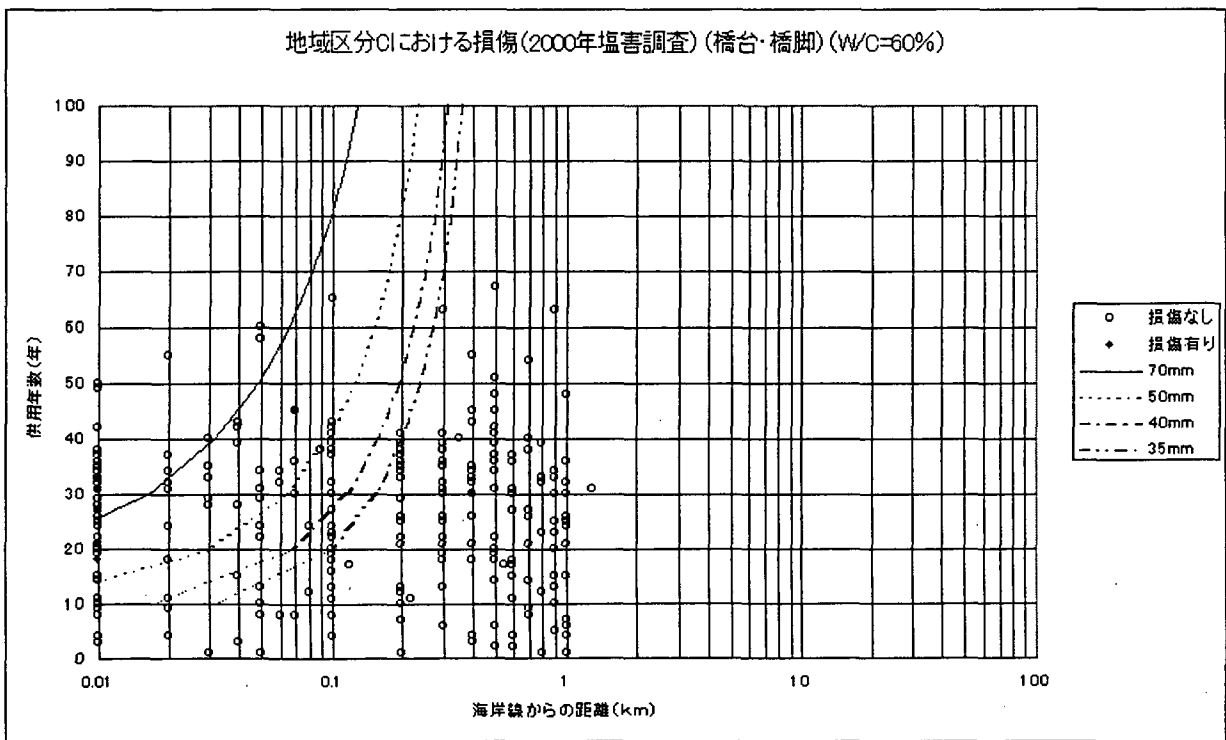


図-5.6.16 地域区分Cにおける損傷(2000年塩害調査)(橋台・橋脚)(W/C=60.0%、C1=2.51)

5.3 評価・検討

5.3.1 検証結果

図-5.6.1～5.6.8は、橋梁が竣工してから現在に至るまでに損傷（剥離・鉄筋露出）が発生している箇所のデータと現在まで一般的に使用されてきたコンクリート強度 $\sigma_{ck} = 21\text{N/mm}^2$ （W/C = 60.0 %）、 $\sigma_{ck} = 24\text{N/mm}^2$ （W/C = 55.0 %）および設計かぶり 70、50、40、35mm について整理したものである。この結果のうち、設計かぶり・耐用年数と海岸線からの距離との関係と、現在、塩害が確認されている海岸線から 1km 以内の損傷状態とを比較する。図-5.6.1～5.6.16を見ると、1km 換算飛来塩分量 C1 に平均値を用いたものは、実際の損傷状態とかけ離れたものとなっているのに対し、平均値+1 σ （標準偏差）を用いたものは、実際の損傷状態に近い傾向を示している。そこで、ここでは、C1 に平均値+1 σ （標準偏差）を用いたものと実態調査との関係について整理することとする。

図-5.6.2、5.6.4、5.6.6、5.6.8をみると、地域区分 B・C とも、損傷ランク II に相当するものが、S59 塩対指針(案)の設計かぶりと海岸線からの距離により求められる耐用年数とほぼ同等ないし試算により得られる耐用年数以上となっていることがわかる。但し、地域区分 C については、地域区分 B より損傷実態との相関が低くなっている。このことから、S59 塩対指針(案)では、現在の供用期間内での塩害に対する耐久性は確保されていることがわかる。しかし、今回目標と考えている耐用年数 100 年に対しては所定の耐久性を満足していないことがわかる。

以上より、S59 塩対指針(案)に対し設計に考慮する年数に 100 年を当てはめた場合、要求される所定の耐久性を満足させることは困難である。そこで、ここでは、設計に考慮する年数として 100 年を想定し、なおかつ、できる限り維持管理を容易にするための対策としてコンクリート強度の増加と設計かぶりの増加を行った場合の対策効果を試算により検証した。結果は図-5.6.17～5.6.31のとおりである。なお、塩害に対する耐久性は、図-5.6.1～5.6.16をみて明らかなように、耐用年数により変動し、コンクリート強度が高い（水セメント比が低い）ほど向上していることがわかる。よって、設計に考慮する年数の設計およびコンクリート強度を上げることにより、耐久性を向上させることができるといえる。このことから本試算では、コンクリート強度 $\sigma_{ck} = 30\text{N/mm}^2$ （W/C=50 %）、設計に考慮する年数を 100 年とした場合の設計かぶりと海岸線からの距離との関係を整理した。その結果、先の「5.5.1 検証結果」と同じように+1 σ 程度の幅をもって評価した場合に実際の損傷データが概ね説明できる。これを踏まえて、かぶりと海岸線からの距離との関係の検討において、C1（0 σ ）のときとバラツキ分を考慮したC1（+1 σ ）のときの曲線を2本引き、その範囲内にほぼ収まるように必要かぶりを設定した。

5.3.2 下部構造におけるかぶり厚と対策区分

表-5.6.1に S59 塩対指針（案）で規定されている最小かぶり厚、表-5.6.2に今回の検証で得られた最小かぶり厚、表-5.6.3に現在の道路橋示方書Ⅳ（H14.3）で規定されている最小かぶり厚を、表-5.6.4に今回の検証結果※で得られた対策区分と S59 塩対指針（案）で規定されている対策区分を示す。

表-5.6.1 S59塩対指針（案）
の最小かぶり値（cm）

対策区分	下部構造	
	梁	柱
I	7.0	7.0
II	5.0	5.0
III	3.5	4.0

表-5.6.2 今回の検討結果の
最小かぶり値（cm）

対策区分	下部構造
	はり、柱、壁
S	9.0
I	9.0
II	7.0
III	5.0

表-5.6.3 道路橋示方書Ⅳ（H14.3）
の最小かぶり値（cm）

対策区分	下部構造
	はり、柱、壁
S	9.0(塗装鉄筋、コンクリート塗装、埋設型枠等を併
I	9.0
II	7.0
III	5.0

表-5.6.4 今回の検証結果とS59塩対指針（案）の対策区分の比較

地域区分	地域	海岸線からの距離	今回の検証結果	塩害対策指針(案)
			対策区分	対策区分
A	沖縄県	海上部及び海岸線から100mまで	S	I
		100mをこえて300mまで	I	△
		上記以外の範囲	II	II
B	北海道、東北、北陸の日本海側	海上部及び海岸線から100mまで	S	I
		100mをこえて300m(200m)まで	I	II
		300m(200m)をこえて500m(300m)まで	II	III
		500mをこえて700mまで	III	△
C	上記以外の地域	海上部及び海岸線から20mまで(海上	S	I
		20m(海岸線)をこえて50m(100m)まで	I	II
		50m(100m)をこえて100m(200m)まで	II	III
		100mをこえて200mまで	III	△

(海岸線からの距離の括弧内は S59 塩対指針（案）の規定値)

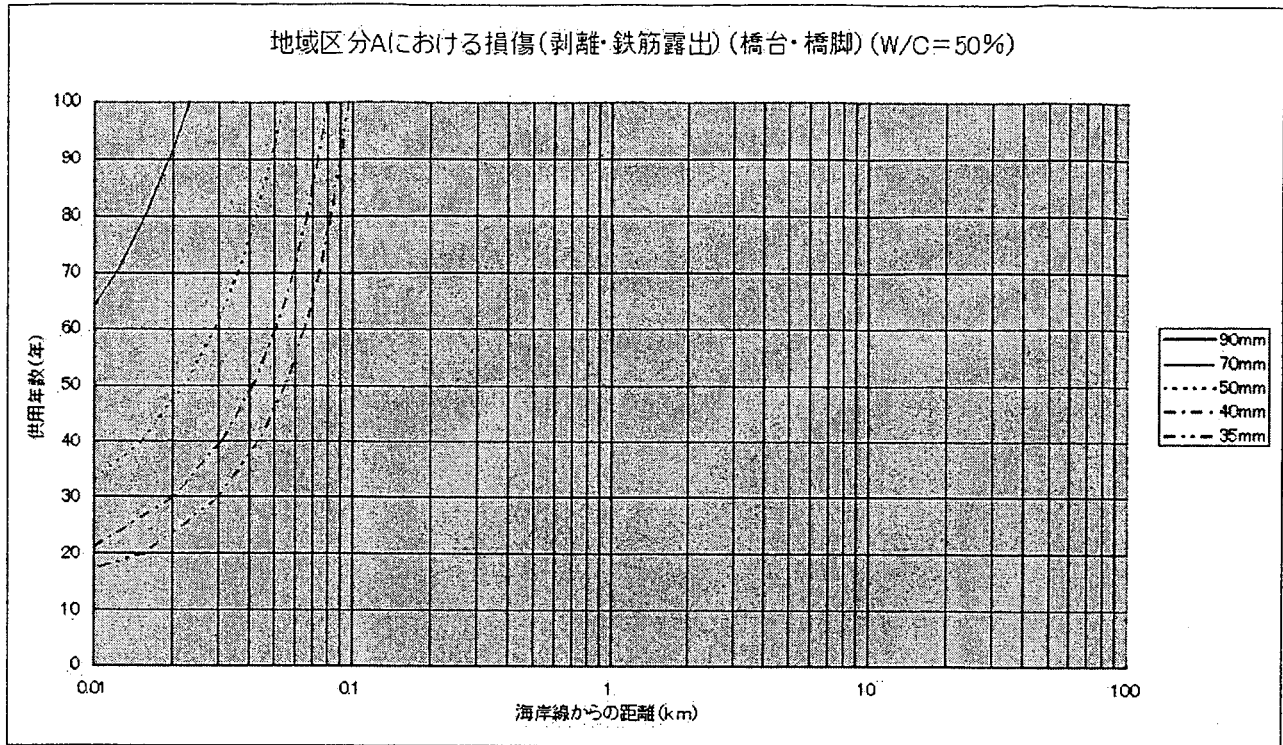


図-5.6.17 地域区分Aにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=50.0%、C1=0.24)

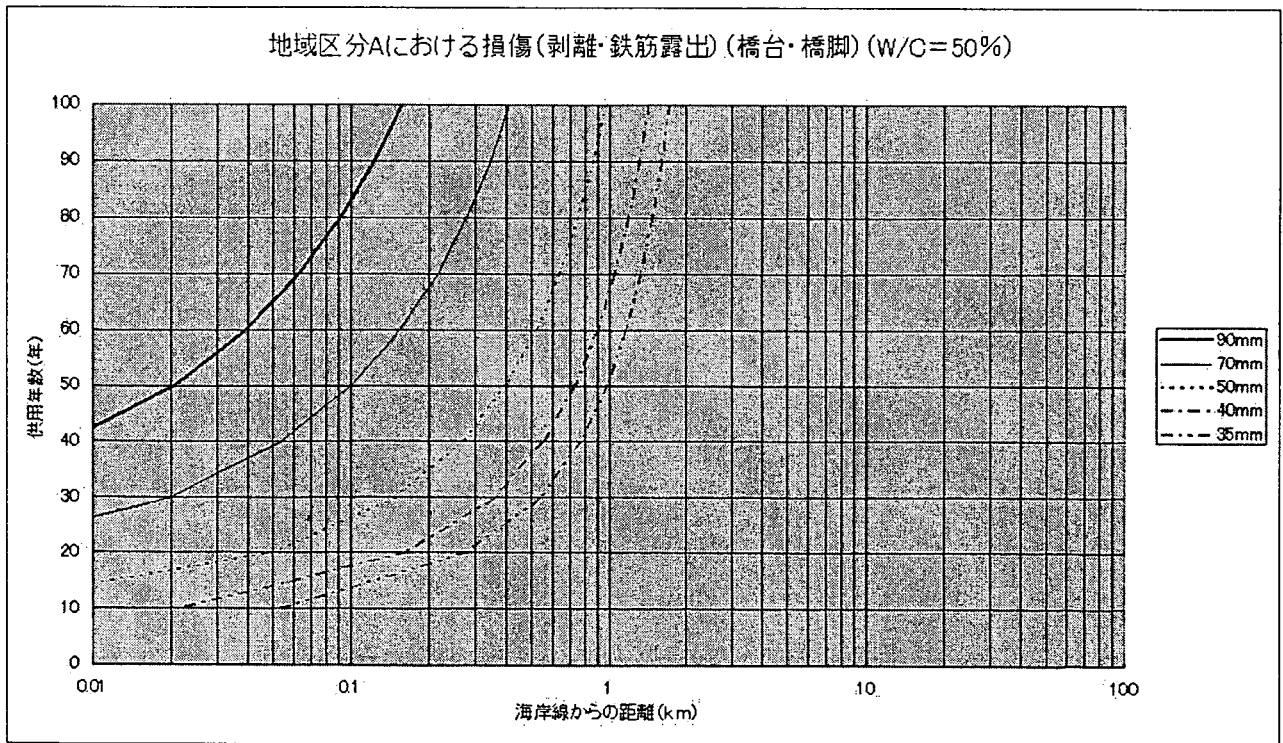


図-5.6.18 地域区分Aにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚)(W/C=50.0%、C1=1.35)

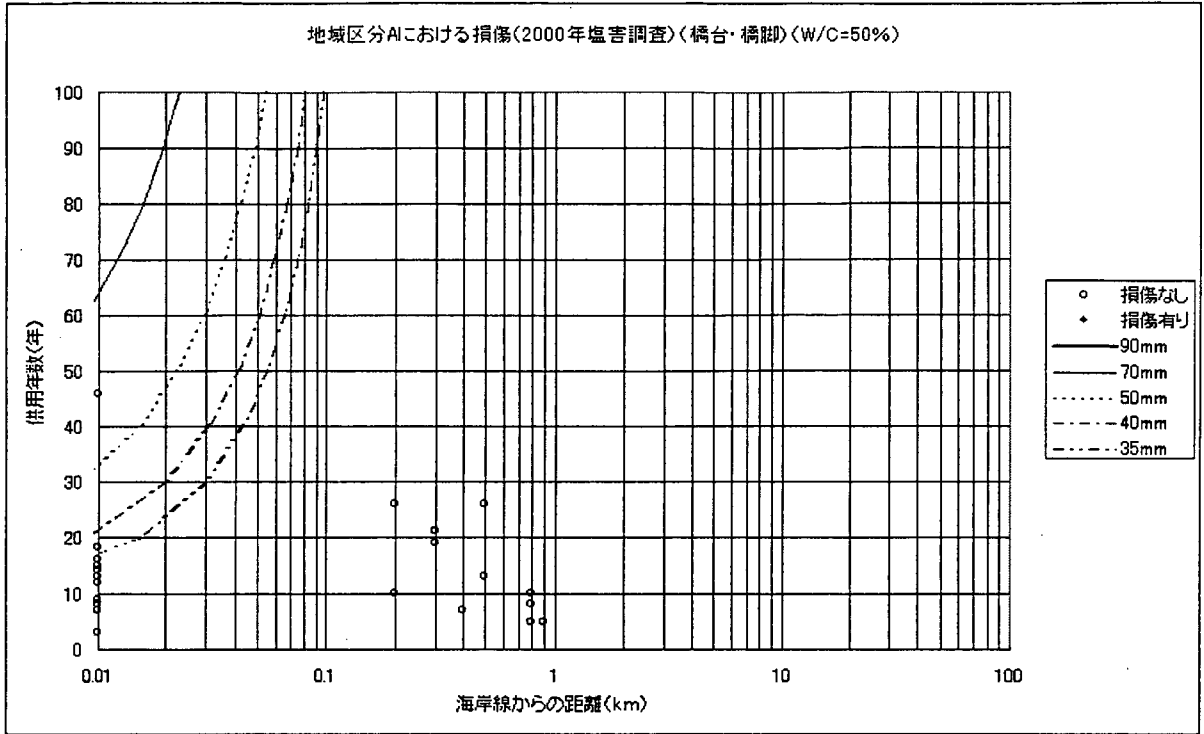


図-5.6.19 地域区分Aにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=50.0%、C1=0.24)

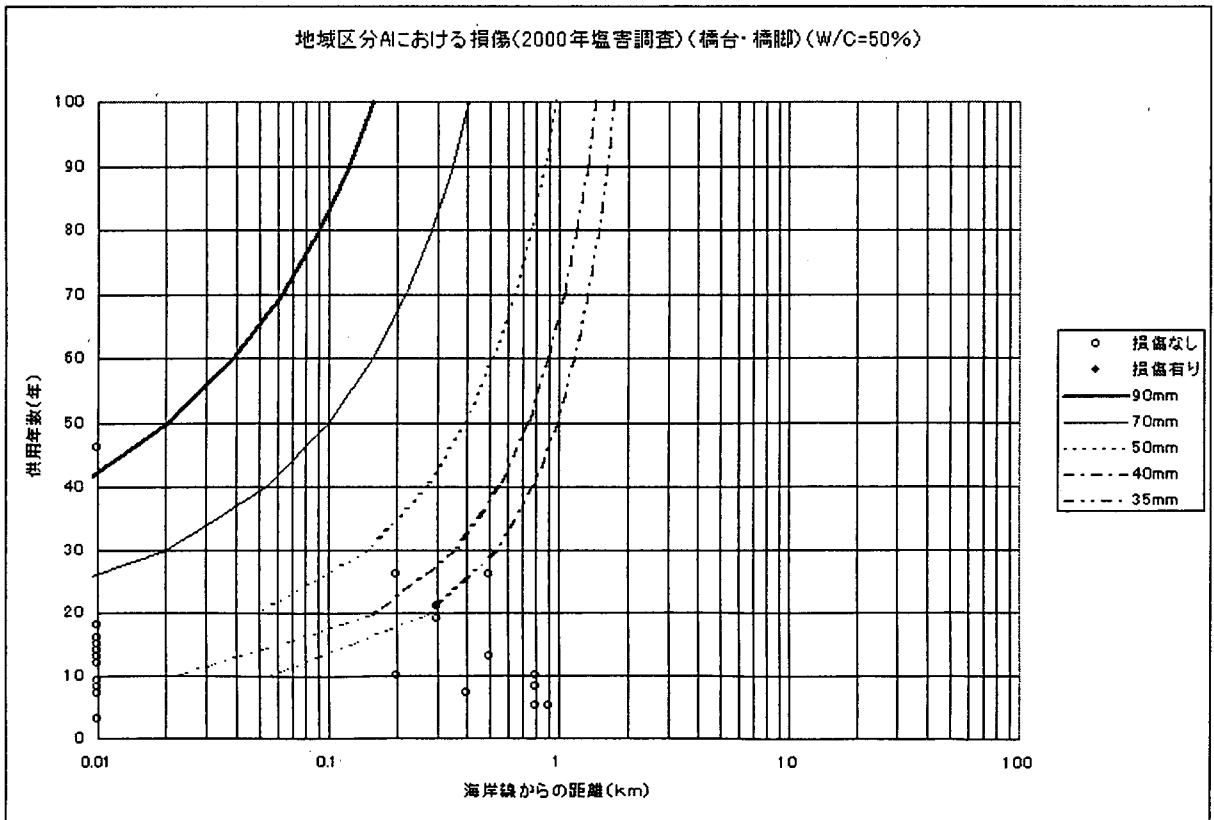


図-5.6.20 地域区分Aにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=50.0%、C1=1.35)

地域区分A 下部工(W/C=50%)

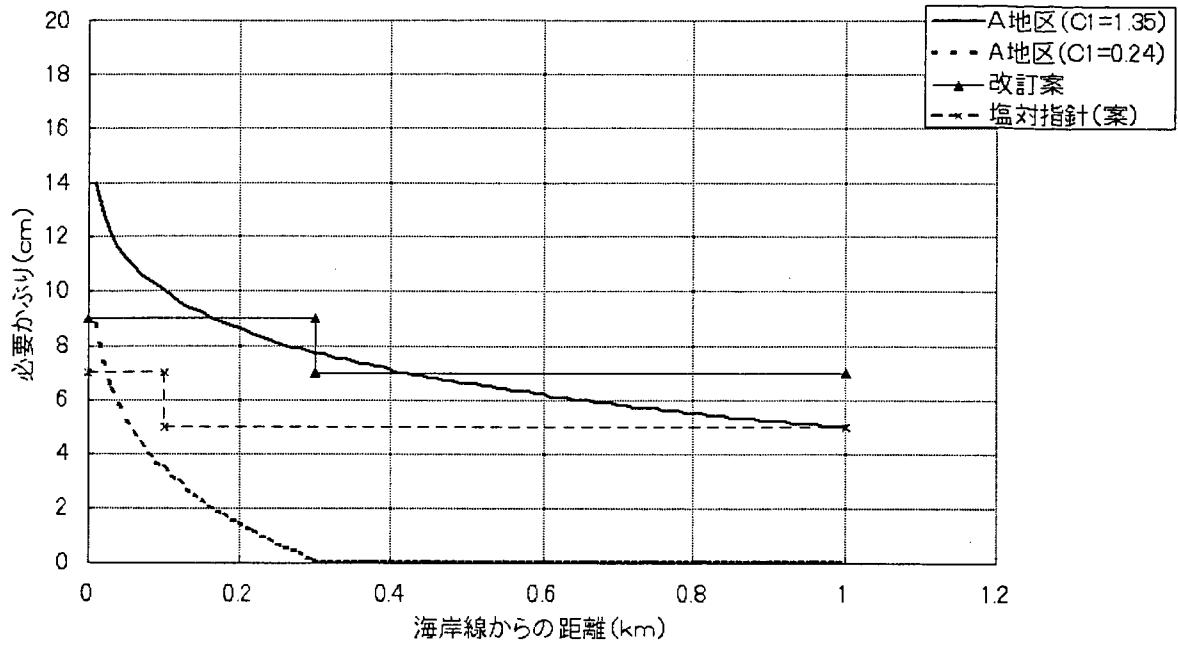


図-5.6.21 地域区分Aにおける海岸線からの距離と必要かぶりの関係

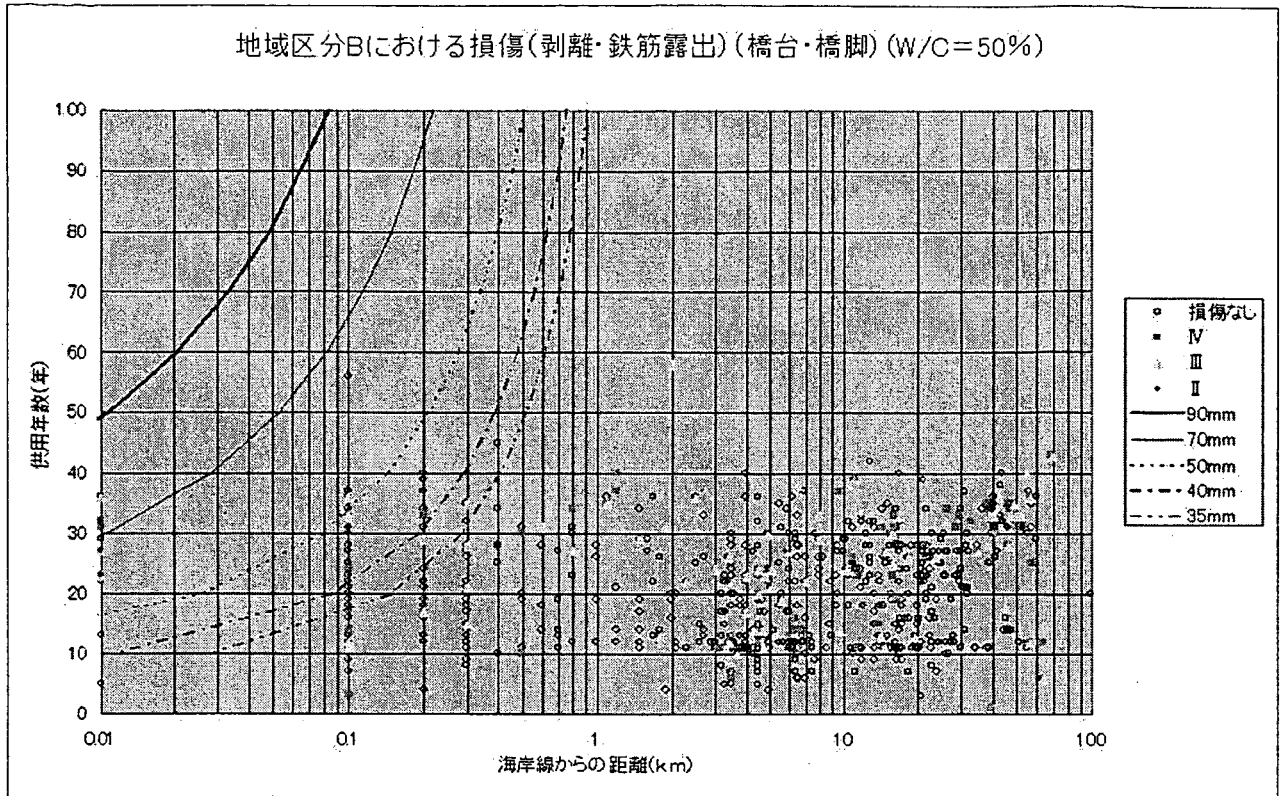


図-5.6.22 地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚) (W/C=50.0%、C1=0.92)

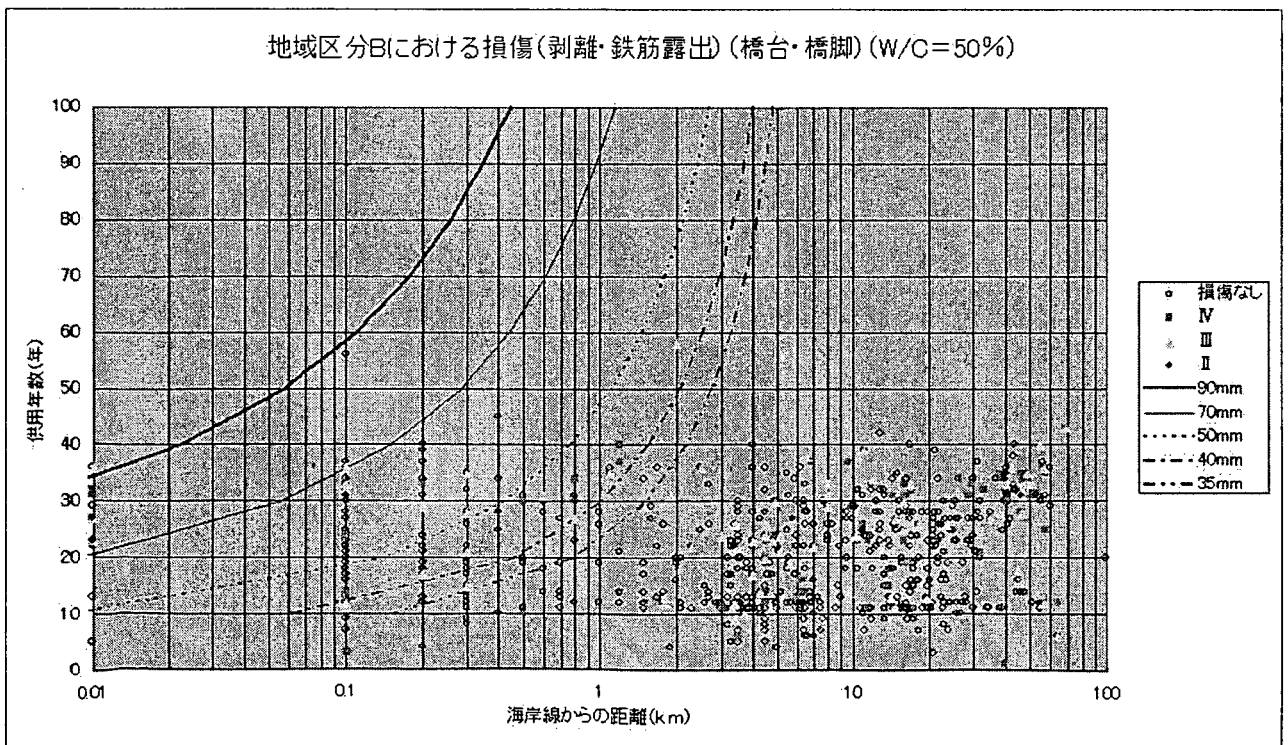


図-5.6.23 地域区分Bにおける損傷(剥離・鉄筋露出)(橋台・橋脚) (W/C=50.0%、C1=2.51)

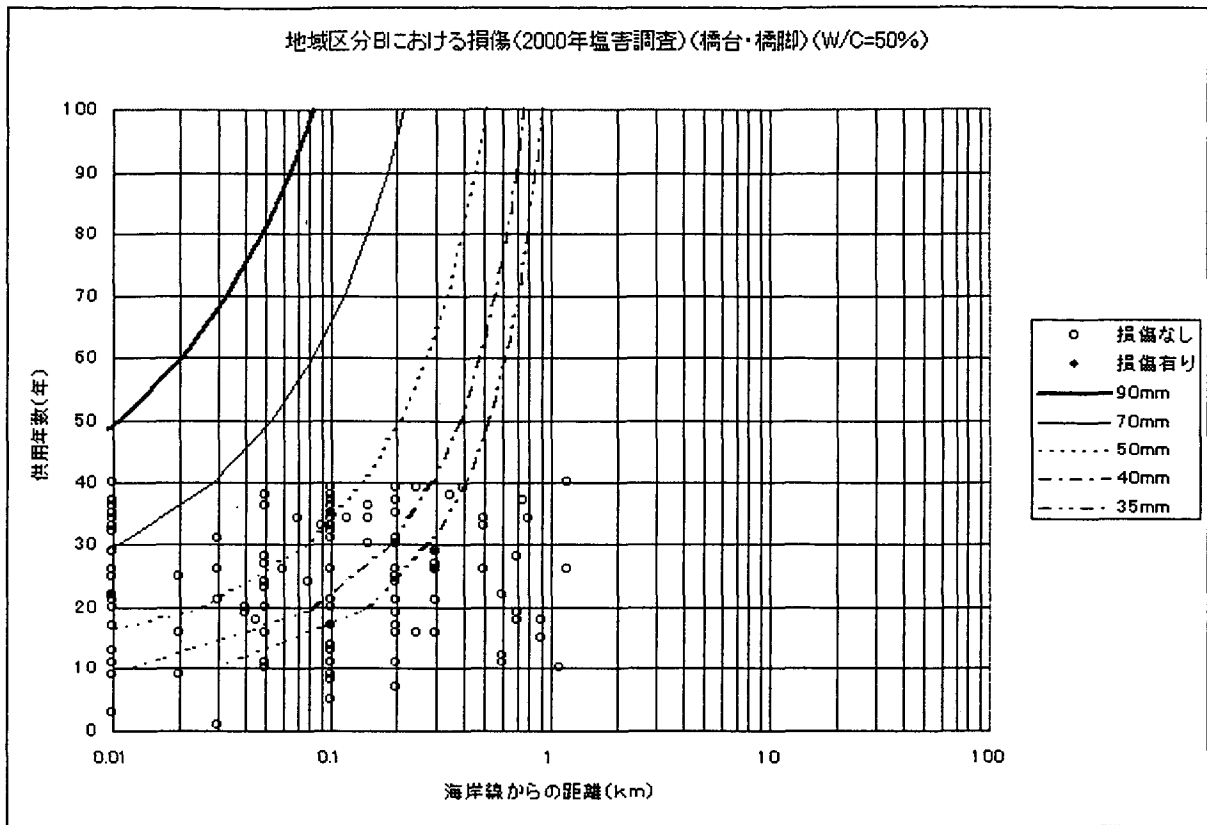


図-5.6.24 地域区分Bにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=50.0%、C1=0.92)

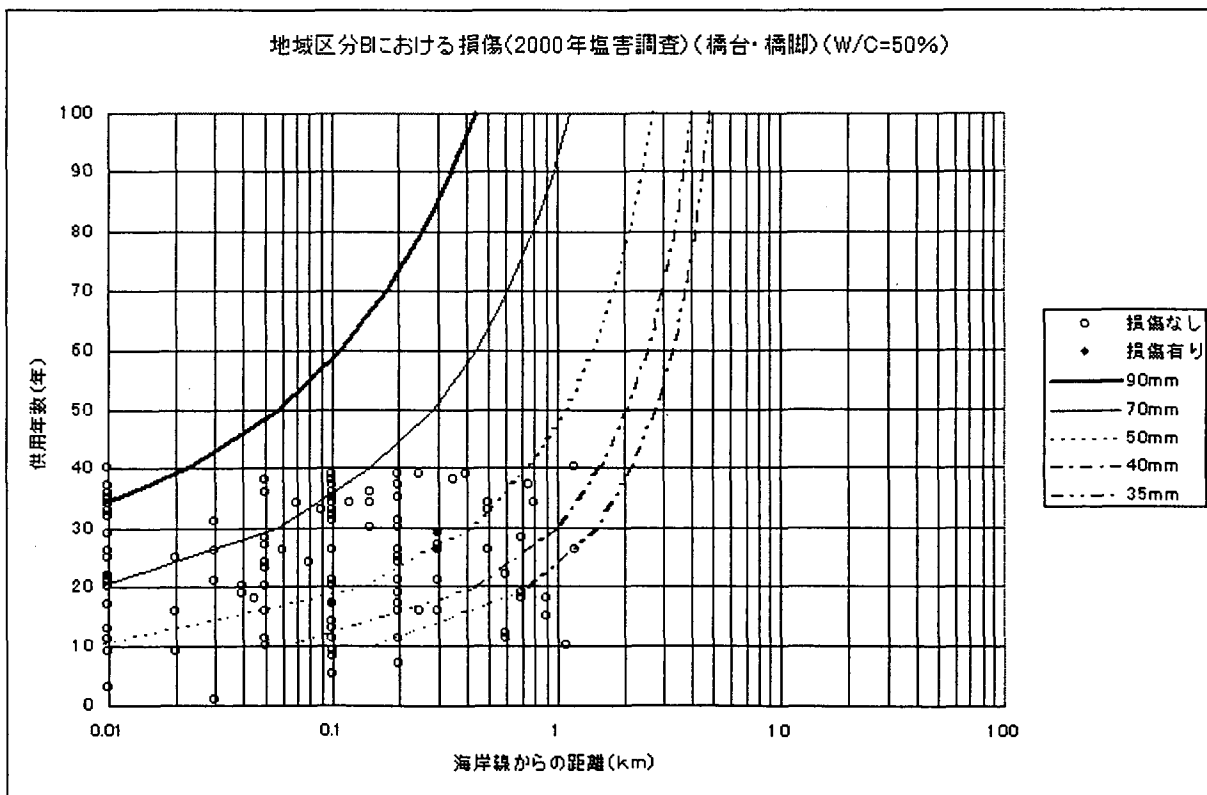


図-5.6.25 地域区分Bにおける損傷 (2000年塩害調査) (橋台・橋脚) (W/C=50.0%、C1=2.51)

地域区分B 下部工(W/C=50%)

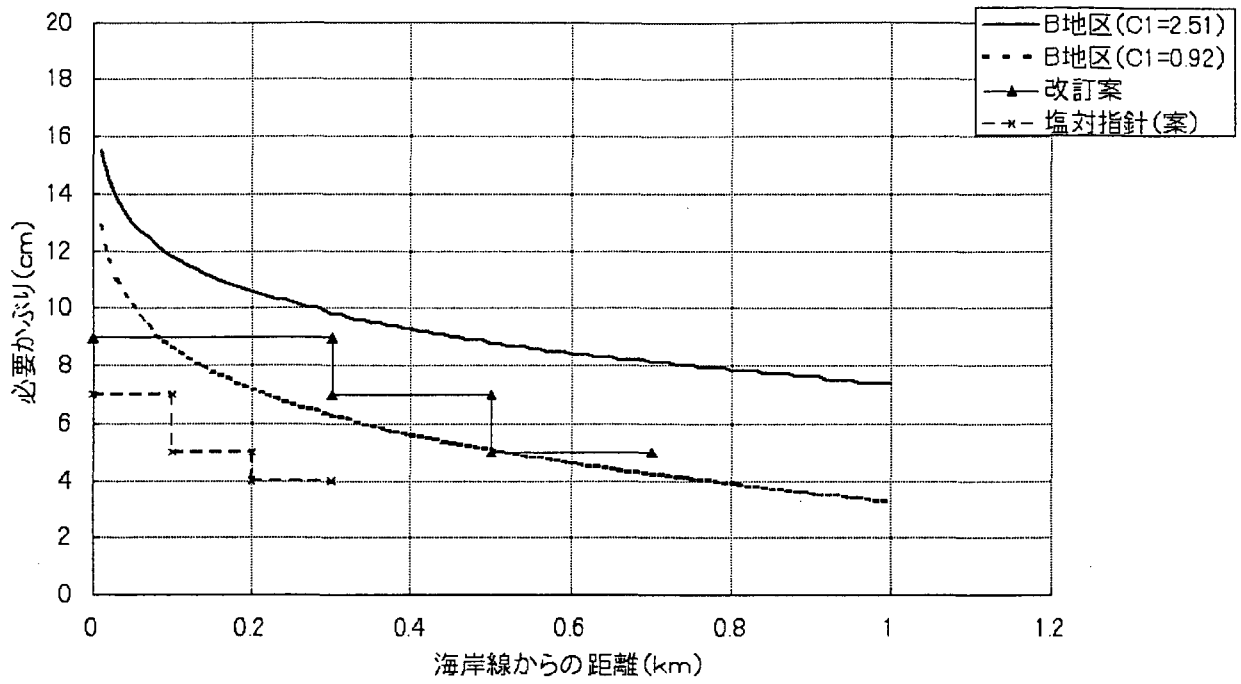


図-5.6.26 地域区分Bにおける海岸線からの距離と必要かぶりの関係

地域区分Cにおける損傷（剥離・鉄筋露出）（橋台・橋脚）(W/C=50%)

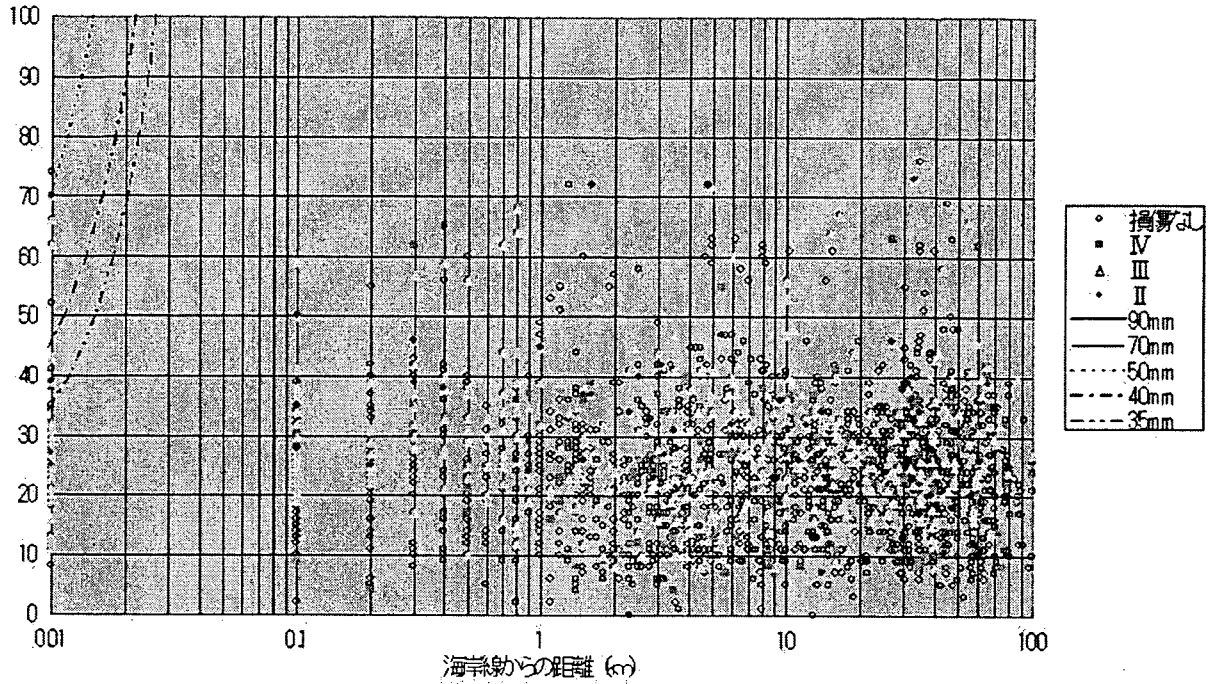


図-5.6.27 地域区分Cにおける損傷（剥離・鉄筋露出）（橋台・橋脚）(W/C=50.0%、C1=0.11)

地域区分Cにおける損傷（剥離・鉄筋露出）（橋台・橋脚）(W/C=50%)

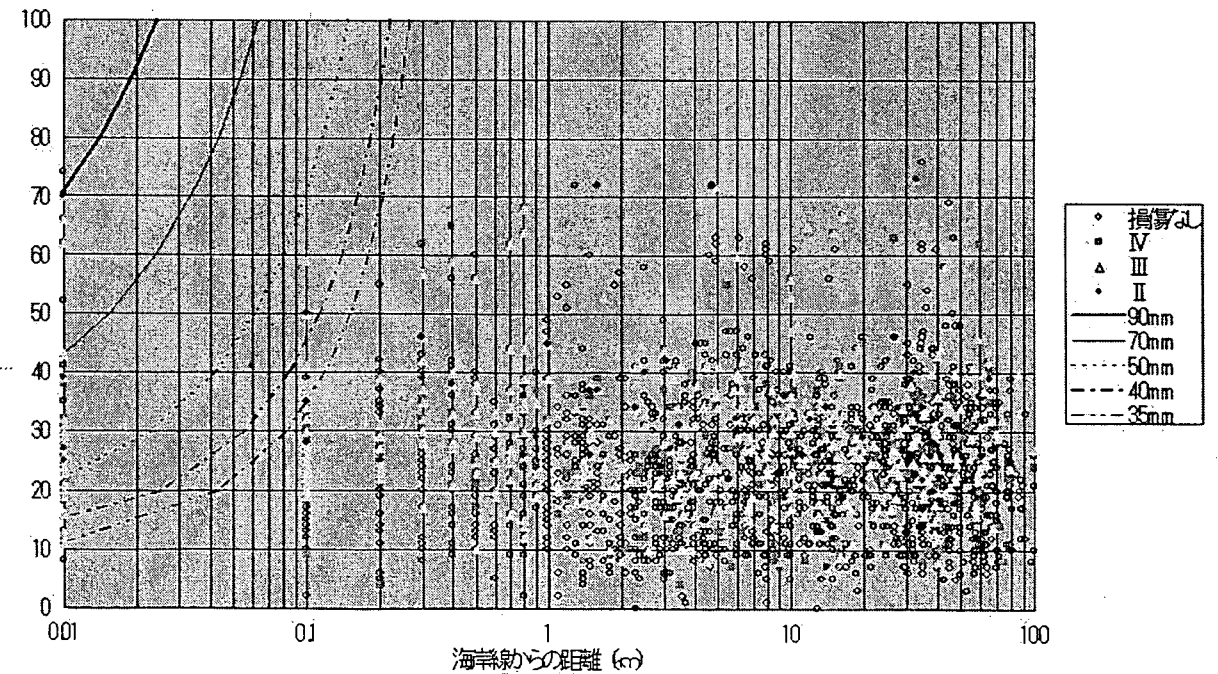


図-5.6.28 地域区分Cにおける損傷（剥離・鉄筋露出）（橋台・橋脚）(W/C=50.0%、C1=0.44)

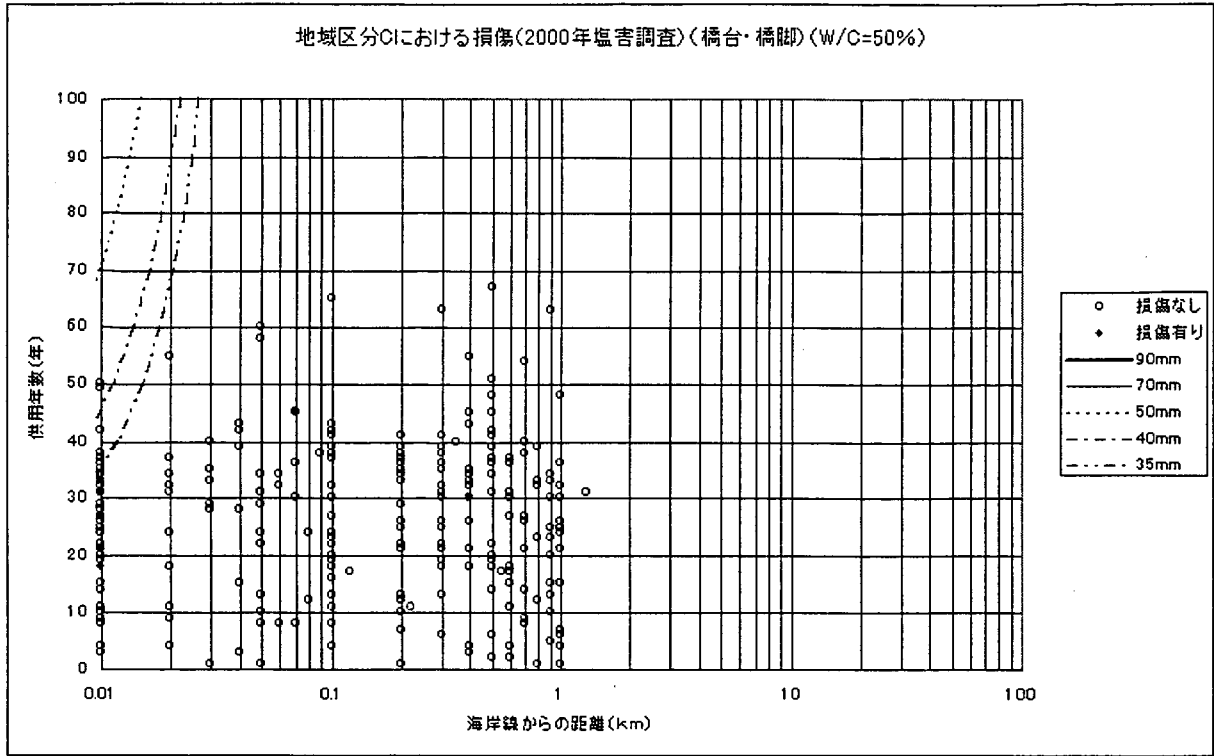


図-5.6.29 地域区分Cにおける損傷(2000年塩害調査)(橋台・橋脚)(W/C=50.0%、 $C1=0.11$)

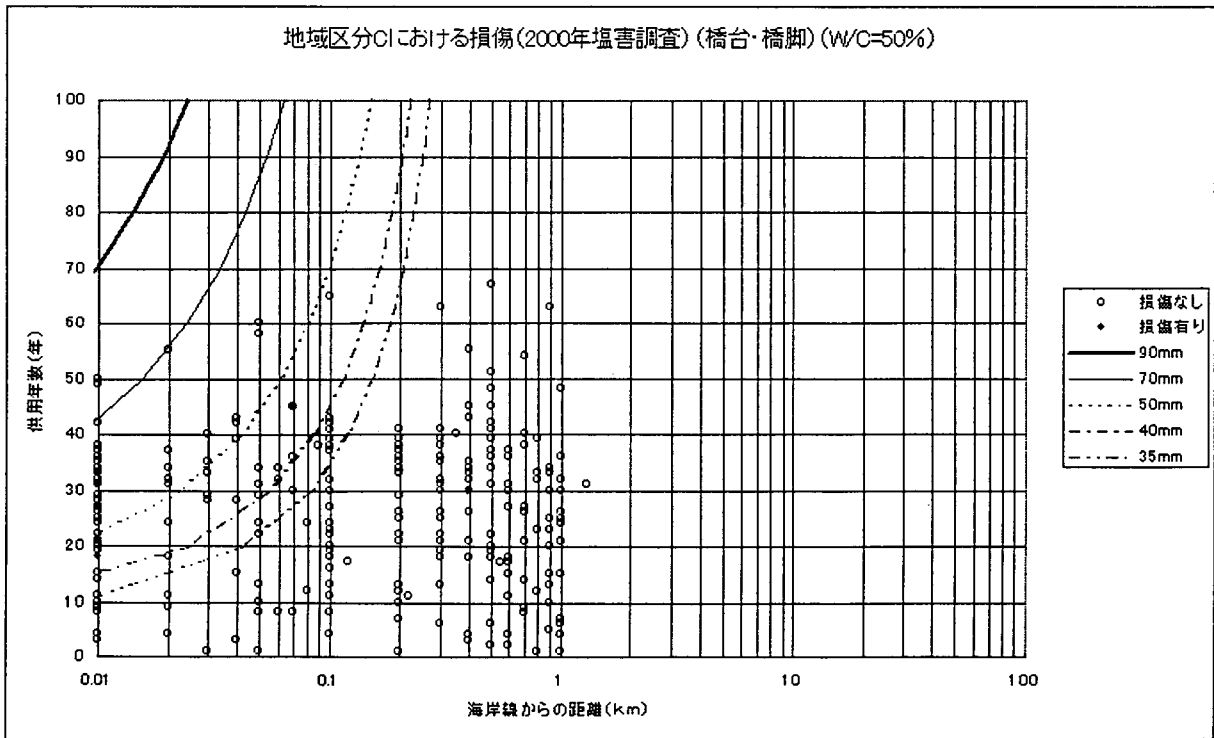


図-5.6.30 地域区分Cにおける損傷(2000年塩害調査)(橋台・橋脚)(W/C=50.0%、 $C1=0.44$)

地域区分C 下部工(W/C=50%)

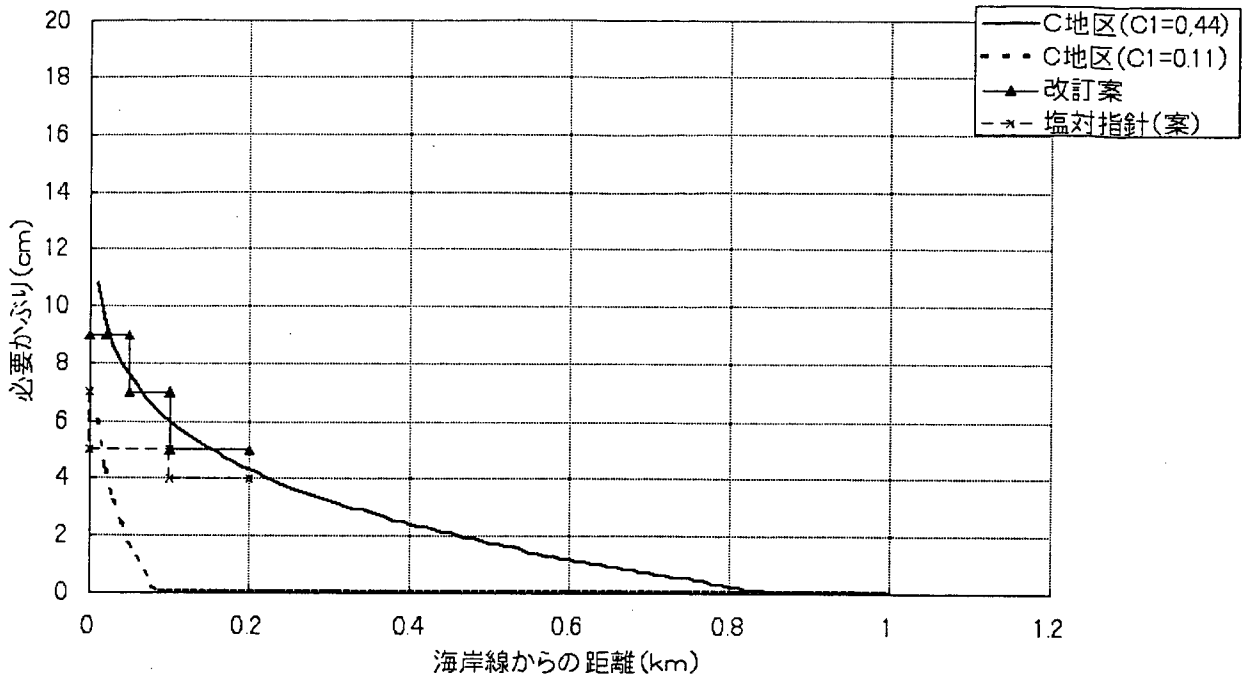


図-5.6.31 地域区分Cにおける海岸線からの距離と必要かぶりの関係